Messungen an elektrischen Maschinen

Apparate, Instrumente, Methoden, Schaltungen

Von

Rudolf Krause
Ingenieur

Dritte, verbesserte und vermehrte Auflage

Mit 207 Textfiguren



Berlin
Verlag von Julius Springer
1916

Vorwort.

Auch bei dieser dritten Auflage der „Messungen an elektrischen Maschinen“ war der Grundgedanke, Studierenden im Laboratorium und jüngeren Ingenieuren ein Hilfsmittel für die Schaltungen und Messungen auf dem Prüffeld und bei Abnahme-Versuchen zu geben. Es konnten deshalb die Grundgesetze und Erzeugungsarten des elektrischen Stromes als bekannt vorausgesetzt werden und es wurde, um den Umfang des Buches handlich zu erhalten, nur das zum Verständnis der Meßmethoden unbedingt Notwendige über die Vorgänge in elektrischen Maschinen und ihre Wirkungsweise gesagt.

Eine durchgreifende Umarbeitung erfuhr der erste Abschnitt, weil sich inzwischen wesentliche Verbesserungen und Neukonstruktionen auf dem Gebiet der elektrischen Meßinstrumente ereignet haben. Es sei auch hier den Firmen, die dem Verfasser Unterlagen über ihre Instrumente gaben und Druckstöcke für Abbildungen hergeliehen haben, bestens gedankt.

In den übrigen Abschnitten sind weniger Änderungen nötig gewesen, denn die meisten Meßmethoden sind heute so gut durchgebildet, daß sie wie z. B. die Leerlaufsarbeiten, kaum noch Verbesserungen erfordern. Andere Messungen wieder, wie die zur Bestimmung des Wirkungsgrades und der Belastungsfähigkeit bleiben im Prinzip immer dieselben, es ändern sich höchstens die Apparate zur Aufnahme und da sind namentlich die Wirbelstrombremsen noch verbessert, die heute auch für Maschinen bis zu 30 PS anwendbar sind. Der Abschnitt über die Aufnahme von periodischen Vorgängen ist erweitert durch Einfügung des Oszillographen. Eine erschöpfende Behandlung sämtlicher Maschinenmessungen sollte allerdings das kleine Buch nicht geben,

wohl aber nach Möglichkeit mehrere Methoden für ein- und denselben Endzweck, damit man bei vorkommenden Fällen Auswahl hat und die Methode nach der Art der Maschine wählen kann.

Eine Erweiterung erfuhr auch die Zahl der Abbildung, die von 178 in der zweiten Auflage auf 207 in der dritten Auflage zugenommen hat.

Hellerau bei Dresden, Januar 1916.

Rudolf Krause.



Inhalt.

Zweiter Abschnitt.

Dritter Abschnitt.



Einleitung.

Die Messungen an elektrischen Maschinen haben im allgemeinen die folgenden beiden Zwecke: erstens, festzustellen, ob die Maschine in der vom Besteller gewünschten Weise arbeitet, zweitens wie sie arbeitet. Die Messungen zu dem erstgenannten Zweck sind meist einfacherer Art, während die Untersuchung der Frage, wie die Maschinen arbeiten, schwierigere, im gewöhnlichen Betrieb nicht vorkommende Schaltungen, Einrichtungen und Messungen verlangt. Ob die Maschinen in der gewünschten Weise arbeiten, erkennt man durch Belastungsproben, bei denen durch Dauerversuche namentlich die Erwärmung und bei Kommutator-Maschinen das Verhalten der Bürsten bezüglich der Funkenbildung beobachtet wird. Häufig bestimmt man hierbei auch noch den Wirkungsgrad. Auch die Prüfung der Isolierung, die zwar zum Teil schon vor dem Zusammenbau der Maschine in der Fabrik erfolgt, ist hierher zu rechnen. Die Frage, ob die Maschine in der gewünschten Weise arbeitet, geht sowohl ihren Käufer als auch ihren Hersteller an, die andere Frage, wie die Maschine arbeitet, beschäftigt nur ihren Hersteller. Damit gute leistungsfähige Maschinen gebaut werden können, muß der Berechner und Entwerfer derselben die Art und die Verteilung der in ihnen auftretenden Verluste genau kennen, ferner die magnetischen Verhältnisse und ihre elektrische Leitfähigkeit. Die Messungen zu dem zweiten Zweck ermitteln daher die Widerstände der Anker- und Magnetwickelung, die Verluste an Wirbelströmen, Ummagnetisierung und Reibung und ihre Verteilung in der Maschine, den Aufwand für die Magnetisierung und ihre Verteilung sowie die Streuungsverluste. Zur zweckmäßigen Erledigung der erwähnten Messungen ist die Kenntnis des Wesens und der Wirkungsweise der zu verwendenden Instrumente und Apparate notwendig. Es soll deshalb zunächst eine Besprechung von Meßinstrumenten erfolgen.

Erster Abschnitt.

Allgemeines über Meßinstrumente, ihre Wirkung und Schaltung.

Zur Messung der elektrischen Größen: Ampère, Volt und Watt sowie auch der Phasenverschiebung und Stromwechselzahl wird die wechselseitige Wirkung von Magneten und stromdurchflossenen Leitern aufeinander, die gegenseitige Einwirkung von zwei stromdurchflossenen Leitern und die Ausdehnung von Leitern durch Stromwärme benutzt. Bei Hochspannung verwendet man auch, hauptsächlich für Spannungsmessungen, statische Instrumente, welche auf der Anziehung von Metallkörpern beruhen, die mit den Punkten verbunden sind, zwischen denen die Spannung bestimmt werden soll. Bei der Einwirkung von Strom und Magnet, der auch ein Weicheisenkern sein kann, ist das Instrument elektromagnetisch; bei der Verwendung stromdurchflossener Leiter heißt es elektrodynamisch oder einfach dynamisch und bei Anwendung der Ausdehnung durch Stromwärme heißt es Hitzdraht-Instrument.

Elektromagnetische Instrumente mit Weicheisenkern.

Ein oder mehrere besonders behandelte und geformte möglichst leichte und kleine Weicheisenkörper unterliegen dem Einfluß einer stromdurchflossenen Spule, welche die Kerne so zu drehen sucht, daß die Schwerkraft ein gegenwirkendes Drehmoment hervorruft. Im stromlosen Zustand wird daher der Zeiger dieser Instrumente durch kleine Gegengewichte auf dem Nullpunkt gehalten, wenn das Instrument die richtige Lage hat, worauf beim Aufhängen zu achten ist. Die Vorteile dieser Instrumente sind folgende: Sie sind billig, mit Gleichstrom rasch zu eichen oder zu prüfen, sowohl für Gleichstrom als für Wechselstrom, innerhalb der praktisch vorkommenden Stromwechselzahlen verwendbar und ziemlich unempfindlich gegen Überlastung und

schlechte Behandlung. Die älteren Instrumente dieser Art hatten verschiedene Fehler, sie waren empfindlich gegen fremde, in ihrer Nähe verlaufende Starkströme und magnetische Felder, was heute durch Eisenschutz fast völlig behoben ist. Dann war der Einfluß des remanenten Magnetismus des Eisenkernes störend, indem das Instrument bei derselben Stromstärke doch nicht denselben Ausschlag zeigte, die Größe des Ausschlages hing davon ab, ob der Strom zu- oder abgenommen hatte, d. h. ob er vorher schwächer war und zugenommen hatte auf den betreffenden Wert oder ob er vorher stärker war und abgenommen hatte. Dieser Fehler ist heute durch Verwendung sehr kleiner leichter Eisenteile, deren Magnetisierung sehr hoch ist, so daß ein wesentlicher Unterschied zwischen auf- und absteigender Magnetisierung besteht, vermieden worden. Auch der Einfluß der Kurvenform des Wechselstromes liegt innerhalb der für technische Instrumente üblichen Genauigkeitsgrenze. Dasselbe gilt über den Einfluß der Temperatur. Der Wattverbrauch ist trotz verhältnismäßig großer Drehmomente nur klein. Durch gute Luftdämpfung, die bei Siemens & Halske durch Öldämpfung in besonderen Fällen verstärkt wird, stellt sich der Zeiger fast aperiodisch ein. Die Teilung der Skala ist nur zu Anfang verkürzt, sonst über den größten Teil ziemlich gleichmäßig. In Fig. 1 ist ein Weicheiseninstrument von Siemens & Halske dargestellt.

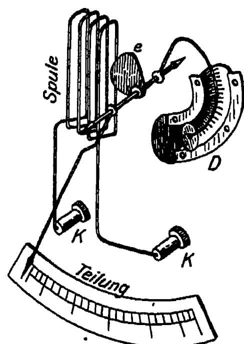


Fig. 1. Weicheiseninstrument von Siemens & Halske.

Die flache Spule mit den Anschlußklemmen K wirkt drehend auf den kleinen blattförmigen Eisenkörper e, an dessen Achse, die mit Spitzen in Steinen läuft, noch der Zeiger und das Dämpfungsblech D sitzen. Von dem kreisförmig gebogenen, hinten geschlossenen Dämpfungszylinder ist die obere Hälfte entfernt. Das Instrument wird als Strommesser und als Spannungsmesser für Gleich- und Wechselstrom ausgeführt. Bei stärkeren Strömen erhalten die Wechselstrominstrumente Meßwandler und die Spannungsmesser erhalten bei Hochspannung Spannungswandler (Meßtransformatoren). Strommesser werden bis 10000 Ampère ausgeführt, Spannungsmesser bis 60000 Volt, zusammen mit Strom-

oder Spannungswandler. Das Amperemeter hat dann gewöhnlich einen Maximalstrom von 5 Amperes und der Stromwandler übersetzt von 5:10000. Das Voltmeter ist bei Hochspannung für 110 Volt aber mit 2000 Volt geprüft und der Spannungswandler hat bei 60000 Volt eine Übersetzung von 50000:110.

Die Weicheiseninstrumente der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft beruhen auf dem in Fig. 2 dargestellten Gedanken.

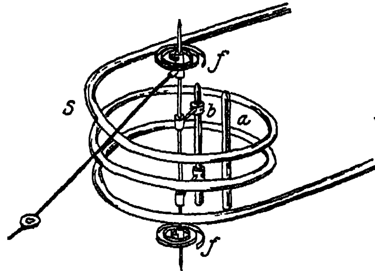


Fig. 2. Grundform eines Weicheiseninstrumentes der A. E. G.

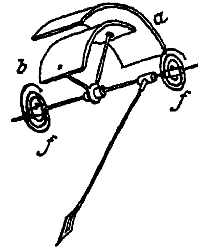


Fig. 3. Eisenbleche in einem Weicheiseninstrument der A. E. G.

Zwei kleine Eisendrähte *a* und *b* befinden sich in einer Spule *S*, welche beide Drähte gleichartig magnetisiert, so daß sie mit gleichen Polen nebeneinander liegen und sich gegenseitig abstoßen. Der Draht *a* steht fest, der Draht *b* ist an seiner Achse drehbar. Er wird sich daher von *a* wegdrehen, so daß der Zeiger einen Ausschlag macht. Spiralfedern *f* liefern den Widerstand gegen die Verdrehung. Ein Instrument dieser Art würde aber eine sehr ungleichförmige Teilung erhalten, deshalb ist die Ausführung etwas anders. Anstatt der Drähte sind gebogene Bleche nach Fig. 3 verwendet, die sich dann ebenso abstoßen, wenn das bewegliche Blech *b* in der Nullage nur teilweise unter dem festen Blech *a* steht. Das Instrument selbst ist nach Fig. 4 ausgeführt. *S* ist die vom Meßstrom durchflossene Spule, in deren Innerem die Bleche nach Fig. 3 untergebracht sind. Die Dämpfung

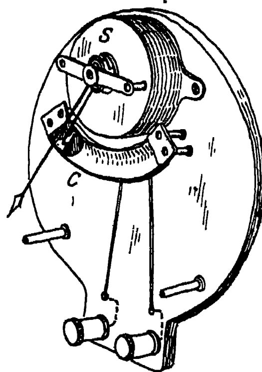


Fig. 4. Weicheiseninstrument der A. E. G.

ist Luftdämpfung, ähnlich wie in Fig. 1, indem auch hier ein gebogener Zylinder *C* mit darin schwingender Scheibe aus Aluminium verwendet wird. Der Deckel über der Dämpfung ist in Fig. 4 nicht mitgezeichnet.

Außer den genannten Firmen stellen noch mehrere Weicheiseninstrumente her, es würde jedoch zu weit führen, auf alle diese Ausführungen einzugehen.

Elektromagnetische Drehspul-Instrumente.

Diese Instrumente, welche gewöhnlich kurz Drehspul-Instrumente genannt werden, beruhen auf einem Prinzip, welches zuerst bei telegraphischen Relais, dann von Deprez d'Arsonval für Spiegelgalvanometer benutzt wurde und durch verschiedene Verbesserungen die noch heute übliche, aber schon seit 20 Jahren bekannte Grundform erhielt, die Fig. 5 zeigt. Die stromdurchflossene Spule, welche sehr leicht sein muß und deshalb aus dünnem Draht in wenig Windungen besteht, ist auf einen aus Kupfer oder Aluminium gepreßten Rahmen *R* gewickelt, welcher sich zwischen den Polen *M* eines Dauerstahlmagneten über dem feststehenden Korn *A* aus Weicheisen drehen kann. Zwei Federn *F*, von denen gewöhnlich die eine über, die andere unter dem Kern *A* liegt, dienen zur Stromzu- und -ableitung für die Drehspule und dadurch, daß bei jeder Feder das eine Ende mit der Achse der Spule verbunden ist, also an der Drehung der Spule mit teilnimmt, während das andere Ende festgespannt ist, liefern die Federn das der Drehkraft des Stromes entgegenwirkende Drehmoment und sobald die Drehspule ohne Strom ist, stellen die Federn den Rahmen immer so ein, daß der mit ihm verbundene Zeiger *Z* auf dem Anfangs-

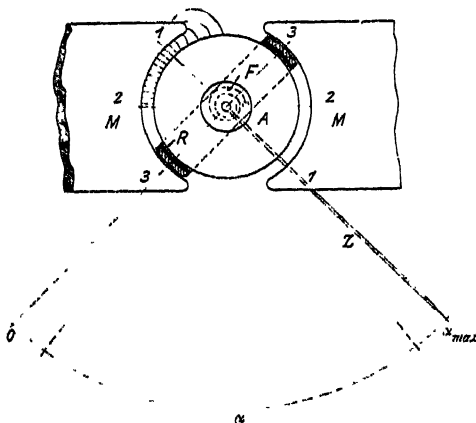


Fig. 5. Drehspulsystem.

punkt O der Teilung steht. Fließt ein Strom durch die Spule, so erfährt sie ein Drehmoment, welches mit der Stärke des Stromes zunimmt. Da das Feld des Stahlmagneten stets gleiche Richtung hat, hängt die Drehrichtung der Spule von der Stromrichtung ab. Daraus folgt, daß die Drehspul-Instrumente nur in einer bestimmten Richtung vom Strom durchflossen werden dürfen, wenn der Zeigerausschlag nach der richtigen Seite erfolgen soll; die Instrumente sind polarisiert. Es ist deshalb auch gewöhnlich an einer Klemme ein + angebracht. Bei falschem Zeigerausschlag wechselt man einfach die Zuleitungen zu den Klemmen.

Bezeichnet man den Strom in der Drehspule mit i, mit H die Feldstärke im Luftspalt zwischen Polen und Eisenkern, dann ist das Drehmoment, welches die Spule erfährt:

$$C_1 \cdot i \cdot H$$

darin ist C_1 eine Konstante, welche von der Windungszahl und den Maßen der Spule abhängt. Diesem Drehmoment wird Gleichgewicht gehalten durch die Spannung der Federn, so daß für irgend einen beliebigen Ausschlag α die Gleichung gilt:

$$C_1 \cdot i \cdot H = C_2 \alpha.$$

Dabei ist C_2 der Verdrehungskoeffizient der Federn. Bei guten Federn ist die Kraft, mit welcher dieselben ihre ursprüngliche Form wieder anzunehmen bestrebt sind, direkt proportional der Verdrehung α; es ist also C_2 auch eine Konstante. Bei guter Ausführung, gleichmäßiger Magnetisierung der Polschuhe und des Stahlmagneten und gleichmäßigem Luftspalt ist das magnetische Feld im ganzen Luftspalt vor den Polen von gleicher Stärke, also ebenfalls konstant. Faßt man daher alle Konstanten C_1, C_2 und H zu der Konstanten C zusammen, dann gilt:

$$i = C\alpha; \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Der Zeigerausschlag α ist also proportional der Stromstärke in der Spule und die Teilung eines gut ausgeführten Drehspulinstrumentes wird vollständig gleichförmig.

Dadurch, daß die Spule auf einen Rahmen aus Kupfer oder Aluminium gewickelt ist, erzielt man eine vorzügliche Dämpfung des Instrumentes. Die Einstellung des Zeigers erfolgt dann aperiodisch, d. h. der Zeiger spielt, ohne lange hin- und herzuschwingen, sogleich auf den dem Strom entsprechenden Ausschlag ein. Eine ganz vollkommene Dämpfung gibt es allerdings nicht, daher ist der Ausdruck „aperiodisch“ nur mit Beschränkung zutreffend. Es kommt bei den besten Drehspulinstrumenten und anderen ge-

punkt O der Teilung steht. Fließt ein Strom durch die Spule, so erfährt sie ein Drehmoment, welches mit der Stärke des Stromes zunimmt. Da das Feld des Stahlmagneten stets gleiche Richtung hat, hängt die Drehrichtung der Spule von der Stromrichtung ab. Daraus folgt, daß die Drehspul-Instrumente nur in einer bestimmten Richtung vom Strom durchflossen werden dürfen, wenn der Zeigerausschlag nach der richtigen Seite erfolgen soll; die Instrumente sind polarisiert. Es ist deshalb auch gewöhnlich an einer Klemme ein $+$ angebracht. Bei falschem Zeigerausschlag wechselt man einfach die Zuleitungen zu den Klemmen.

Bezeichnet man den Strom in der Drehspule mit i, mit H die Feldstärke im Luftspalt zwischen Polen und Eisenkern, dann ist das Drehmoment, welches die Spule erfährt:

$$C_1 \cdot i \cdot H$$

darin ist C_1 eine Konstante, welche von der Windungszahl und den Maßen der Spule abhängt. Diesem Drehmoment wird Gleichgewicht gehalten durch die Spannung der Federn, so daß für irgend einen beliebigen Ausschlag α die Gleichung gilt:

$$C_1 \cdot i \cdot H = C_2 \alpha.$$

Dabei ist C_2 der Verdrehungskoeffizient der Federn. Bei guten Federn ist die Kraft, mit welcher dieselben ihre ursprüngliche Form wieder anzunehmen bestrebt sind, direkt proportional der Verdrehung α; es ist also C_2 auch eine Konstante. Bei guter Ausführung, gleichmäßiger Magnetisierung der Polschuhe und des Stahlmagneten und gleichmäßigem Luftspalt ist das magnetische Feld im ganzen Luftspalt vor den Polen von gleicher Stärke, also ebenfalls konstant. Faßt man daher alle Konstanten C_1, C_2 und H zu der Konstanten C zusammen, dann gilt:

$$\boldsymbol{i = C\,\alpha}; \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

Der Zeigerausschlag α ist also proportional der Stromstärke in der Spule und die Teilung eines gut ausgeführten Drehspulinstrumentes wird vollständig gleichförmig.

Dadurch, daß die Spule auf einen Rahmen aus Kupfer oder Aluminium gewickelt ist, erzielt man eine vorzügliche Dämpfung des Instrumentes. Die Einstellung des Zeigers erfolgt dann aperiodisch, d. h. der Zeiger spielt, ohne lange hin- und herzuschwingen, sogleich auf den dem Strom entsprechenden Ausschlag ein. Eine ganz vollkommene Dämpfung gibt es allerdings nicht, daher ist der Ausdruck „aperiodisch“ nur mit Beschränkung zutreffend. Es kommt bei den besten Drehspulinstrumenten und anderen ge-

dämpften Instrumenten vor, daß bei plötzlichem Einschalten des Höchststromes der Zeiger infolge des starken Drehmomentes etwas über den größten Ausschlag hinausgeht, aber bei guter Dämpfung ist das zu weite Hinausschlagen nur gering und beim Rückgang bleibt dann der Zeiger auch schon ohne weitere Schwingungen auf dem richtigen Ausschlag stehen. Bei schwächeren Strömen wirkt die Dämpfung gewöhnlich vollkommen. Ein ungedämpftes Instrument würde bei jeder Änderung des Stromes in Schwingungen geraten und immer erst nach einer größeren Zahl von Schwingungen zur Ruhe kommen. In Betrieben mit stark schwankender Belastung (Bahnen, Walzwerke) würde ein ungedämpftes Instrument unmöglich sein.

Die Dämpfung ist bei diesen Drehspulinstrumenten durch Anwendung des schon erwähnten Kupfer- oder Aluminium-Rahmens eine elektromagnetische. Durch die Bewegung des Rahmens in dem Magnetfelde des Luftspaltes entstehen in ihm elektrische Ströme, welche geschlossene Bahnen vorfinden und die durch das Drehmoment des Meßstromes hervorgerufene überschüssige Bewegungsenergie verbrauchen.

In Fig. 6 ist die heute, abgesehen von der Form des Magneten, die für die Wirkungsweise gleichgültig ist, allgemein von den Firmen, die diese Instrumente bauen, benutzte Anordnung eines Drehspulinstrumentes dargestellt. *m* ist der Stahlmagnet, der aus sehr hartem Stahl besteht und einer besonders sorgfältigen Magnetisierung unterworfen wird, damit er seinen Magnetismus möglichst für die ganze Lebenszeit des Instrumentes, sachgemäße Behandlung vorausgesetzt, unverändert beibehält. Der Luftspalt muß möglichst klein gehalten werden (Ausführungen mit 1 mm sind üblich), damit das Magnetfeld innerhalb der Pole gleichförmig bleibt. Es tritt nämlich an den Kanten 1 und 3 (vgl. Fig. 5) eine Streuung der magnetischen Linien ein, wodurch in der Nähe dieser Kanten die Dichte des Feldes geringer ist und die Konstante *C*

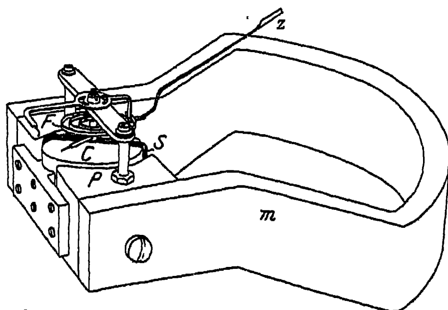


Fig. 6. Drehspulinstrument, fast allgemein übliche Form.

in Gleichung 1 einen anderen Wert erhält, mit anderen Worten, das Instrument würde bei kleinen und bei großen Ausschlägen nicht mehr genau zeigen; man vermied deshalb auch bei sehr genauen Messungen früher Ablesungen unter 10 Teilstrichen und über 140 Teilstrichen, bei der meist gebräuchlichen Teilung der Skala in 150 Teilstriche. Je kleiner der Luftspalt ist, um so geringer ist die Streuung an den Polkanten und damit der eben erwähnte Fehler, der tatsächlich heute bei guten Drehspulinstrumenten nicht mehr beachtet zu werden braucht, weil auch die Teilung der Skala sehr sorgfältig jedem Instrument individuell angepaßt wird. Nach einem Prüfungsschein der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt über ein transp. Normal-Milli-Volt-Amperemeter Type *W* der Firma Hartmann & Braun A. G. vom 17. Juli 1908 lieferten die Messungen für das Instrument, welches eine Teilung bis 150 besaß und durch Meßwiderstände und Vorschaltwiderstände für mehrere Meßbereiche eingerichtet war, folgende Ergebnisse: (Siehe Tabelle S. 9.)

Es treten dabei einige Male bei 140 Teilstrichen Werte von 139,9 und bei 100 Teilstrichen Werte von 99,9 auf, also 0,1 % Unterschied zwischen wirklich gemessenem Wert und vom Instrument angezeigten. Ein solcher Fehler fällt aber innerhalb der zulässigen Grenzen und kann auch mit Sicherheit kaum genau nachgewiesen werden.

Infolge des kleinen Luftspaltes muß natürlich das ganze schwingende System, die Drehspule *S* mit Federn *F* und Zeiger *Z* möglichst leicht sein. Außer dem schon erwähnten Vorzug des kleinen Luftspaltes sind noch zwei weitere die, daß der Magnet, da er in seinem magnetischen Kreis nur wenig Luft besitzt, länger unverändert bleibt und daß eine gute Dämpfung erzielt wird. Gewöhnlich erhält die Drehspule keine durchgehende Achse, sondern nur oben und unten Spitzen. Dadurch ist das Instrument, weil die Spule mit der Achse nicht starr ist, sondern federn kann, weniger empfindlich gegen Stöße. Die Lagerung der Drehspule erfolgt mit den Achsenspitzen in Steinen. Der Zylinder *C*, über dem die Spule schwingt, und die Polschuhe *P* des Magneten sind aus ganz weichem Eisen hergestellt, weil nur dieses genügend durch und durch gleichmäßiges Material aufweist, was zur Erreichung eines gleichförmigen Feldes im Luftspalt nötig ist.

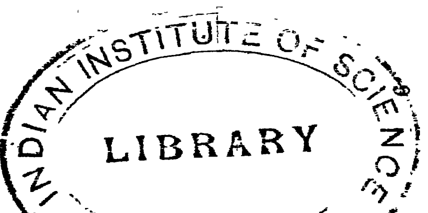
Außer der schon erwähnten Firma Hartmann & Braun stellen noch eine ganze Anzahl anderer, die Allgemeine Elektrizi-

Prüfung als Spannungsmesser.

Einstellung auf den Teilstrich		Gemessene Spannung für Meßbereich 0,150 Volt (an den Enden der Verbindungsschnüre)	0,300 Volt (an den Enden der Verbindungsschnüre)	150 Volt	300 Volt	750 Volt
bei kurzer Einschaltung	50	0,001 × 50,0 Volt	0,002 × 50,0 Volt	50,0 Volt	2 × 50,0 Volt	5 × 50,0 Volt
	100	100,0 „	100,0 „	100,0 „	100,0 „	100,0 „
	140	139,9 „	140,0 „	139,9 „	139,9 „	139,9 „
nach einstündiger Einschaltung auf Teilstrich 150	140		139,9 „			
	100		100,0 „			
	50		50,0 „			

Prüfung als Strommesser.

Einstellung auf den Teilstrich		Gemessene Stromstärke für Meßbereich 0,030 Amp.	3 Amp.	30 Amp.	150 Amp.	300 Amp.	600 Amp.
bei kurzer Einschaltung	50	0,0002 × 50,0 Amp.	0,02 × 50,0 Amp.	0,2 × 50,0 Amp.	50,0 Amp.	2 × 50,0 Amp.	4 × 50,0 Amp.
	100	100,0 „	100,0 „	99,9 „	100,0 „	99,9 „	99,9 „
	140	139,9 „	139,9 „	139,9 „	139,9 „	139,9 „	139,9 „
nach einstündiger Einschaltung auf Teilstrich 150	140		139,9 „				
	100		99,9 „				
	50		50,0 „				



täts-Gesellschaft, Siemens & Halske und andere Drehspulinstrumente her.

In Fig. 7 ist ein Instrument der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft dargestellt. Man erkennt den Stahlmagneten, dessen Formen bei den einzelnen Firmen verschieden sind, die Polschuhe, den Weicheisenzylinder mit der Drehspule, die obere Spiralfeder, den Zeiger und die Skala, unter deren Teilung der Spiegel sichtbar ist. Dadurch, daß der Zeiger oben eine abgeflachte, messerförmige Spitze hat, gegen deren Schneide man sieht, wie Fig. 6 zeigt, vermeidet man Ablesungsfehler, indem man nur dann abliest, wenn

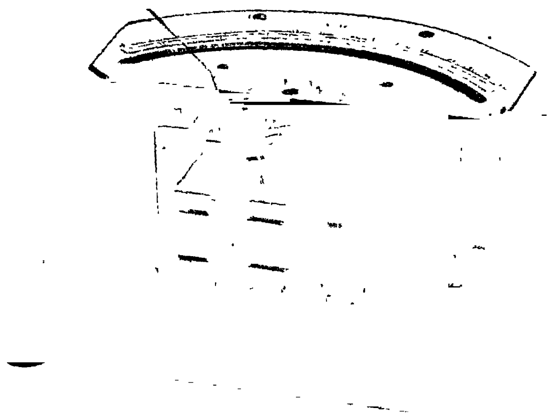


Fig. 7. Geöffnetes Drehspulinstrument der A. E. G.

Spiegelbild und Messerschneide des Zeigers sich decken. Diese Einrichtung wird auch bei allen Firmen benutzt und auch bei anderen Instrumenten.

Hartmann & Braun, von denen Fig. 14 ein Drehspulinstrument zeigt, haben zur Vermeidung von Ablesungsfehlern bei ihren Normalinstrumenten außer der gewöhnlichen Form (Fig. 14) einen gesetzlich geschützten Fadenzeiger mit durchscheinendem Beleuchtungsschirmchen eingeführt. Der Zeiger ist oben seitlich ausgebogen und besitzt dort einen Faden eingespannt. Außerdem sitzt dort ein kleines, schmaler als der Spiegel ausgeführtes durchscheinendes Scheibchen, welches etwas über den Faden hinweggeht. Man liest ab, wenn der Faden und sein Spiegelbild sich decken, kann aber beides infolge der kleinen hellen Scheibe sehr scharf erkennen.

Weiter läßt sich diese Einrichtung noch mit einer ebenfalls gesetzlich geschützten Lupen-Ablesevorrichtung verbinden.

Wie aus vorstehender Beschreibung folgt, müssen die Drehspulinstrumente sehr dünndrähtige Spulenwickelung haben und können deshalb nur schwache Ströme in der Drehspule aushalten. Die 10ohmigen Milliamperemeter von Siemens & Halske haben bei 0,0045 Ampere in der Drehspule schon ihren größten Ausschlag, die 1ohmigen Milliamperemeter derselben Firma haben bei 0,15 Ampere in der Drehspule ihren größten Ausschlag. Bei anderen Firmen sind ähnlich kleine Stromwerte in der Wickelung der Drehspule üblich.

Zur Messung stärkerer Ströme, wie sie bei Maschinenmessungen stets vorhanden sind, muß man einen Meßwiderstand s nach Fig. 8 in die Leitung schalten, deren Strom gemessen werden soll und mit dessen Endpunkten das Instrument durch Leitungen L verbinden. Man bestimmt also den Strom der Leitung durch Messung des Spannungsabfalles in dem Meßwiderstand (der bisweilen in Preislisten auch als „shunt“ bezeichnet wird, eine Bezeichnung, die abgesehen von dem Fremdwort auch noch falsch ist, denn der Meßwiderstand liegt nicht im Nebenschluß, er liegt in der Hauptleitung und das Instrument liegt in „shunt“-Schaltung).

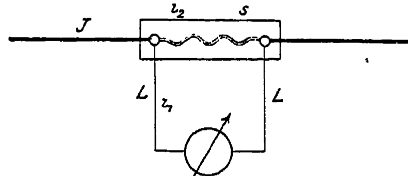


Fig. 8. Strommessung mit Meßwiderstand.

Für die Schaltung nach Fig. 8 ergibt sich folgende Ableitung:

$$J = i_1 + i_2;$$
$$i_2 \cdot s = i_1 \cdot g;$$
$$i_2 = \frac{i_1 \cdot g}{s};$$ eingesetzt in die erste Gleichung gibt

$$J = i_1 \left(1 + \frac{g}{s}\right); \quad \ldots \ldots \quad (2)$$

Die Gleichung (2) sowie auch die Schaltung nach Fig. 8 gilt ganz allgemein für jedes beliebige Amperemeter, mit dem man Ströme J messen will, die stärker sind als der Strom i_1, der durch das Instrument gehen darf. Die Drehspulinstrumente weisen natürlich besonders günstige Verhältnisse für die Messung nach Fig. 8 vor, denn der Widerstand s, der in die Leitung geschaltet

wird, muß praktisch ohne Einfluß auf die übrigen Widerstandsverhältnisse des Stromkreises bleiben. Eine kleine Rechnung dar-

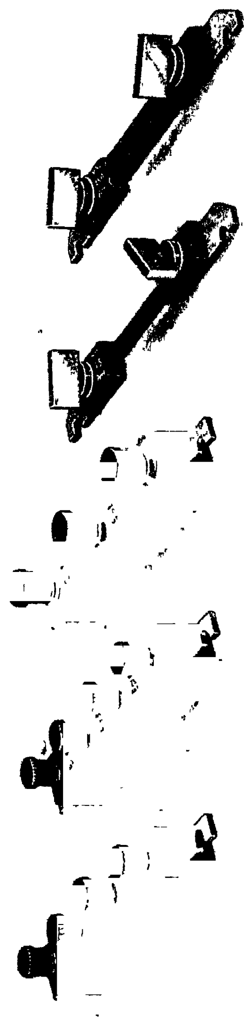


Fig. 9. Meßwiderstände von Siemens & Halske zum Anstecken an das Instrument.

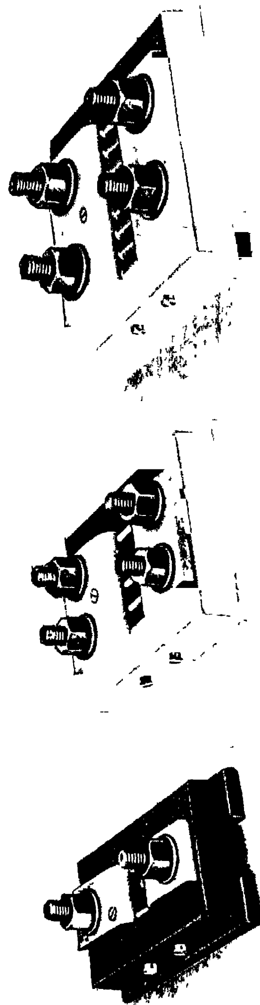


Fig. 10. Meßwiderstände für stärkere Ströme von Siemens & Halske.

über ergibt folgendes: Bei dem schon erwähnten Drehspulinstrument von Siemens & Halske mit $g = 100\ \Omega$ ist $i_1 = 0{,}0045$ Amp. Aus Gleichung (2) ergibt sich für die Messung eines Stromes $J = 30$ Amp. ein Meßwiderstand

$$s = \frac{i_1 \cdot g}{J - i_1} = \frac{0{,}0045 \cdot 100}{29{,}9955} \sim 0{,}015\ \Omega.$$

Bei stärkerem Strom J wird der Meßwiderstand noch kleiner. Gewöhnlich wird bei Strommessung die Gleichung 2 nicht benutzt, weil die Instrumente und Meßwiderstände so eingerichtet sind, daß auch einfache Rechnungen überflüssig werden. So sind z. B. auf den Meßwiderständen die höchsten meßbaren Ströme immer angegeben. Hat ein Drehspulinstrument wie gewöhnlich 150 Teilstriche und benutzt man einen Meßwiderstand mit der Angabe 75 Amp., so bedeutet dies, es ist der Strom $J = 75$ Amp., wenn bei Anschluß dieses Meßinstrumentes das Instrument 150 Striche Ausschlag zeigt. Bezeichnet man den Ausschlag mit α, so ist also in diesem Fall $J = \frac{\alpha}{2}$. Ähnliche einfache Beziehungen zwischen Ausschlag und Strom sind in allen Fällen üblich. Fig. 9 zeigt Meßwiderstände zum Anstecken an das Instrument. Sie sind mit Lappen versehen, die Aussparungen besitzen, mit denen sie zum Ersparen besonderer Verbindungsleitungen, wie Fig. 12 zeigt, unmittelbar unter die Klemmen K des Instrumentes geschoben werden. Die für die schwächeren Ströme haben mehrere Abteilungen, sie sind von links nach rechts für folgende Werte bestimmt:

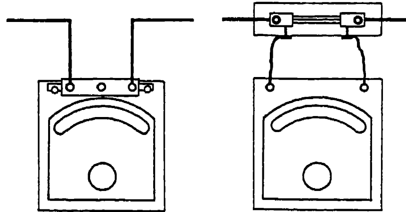


Fig. 11. Meßwiderstände, links zum Anstecken, rechts mit besonderen Zuleitungen.

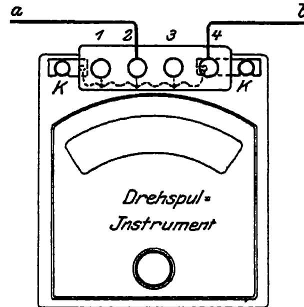


Fig. 12. Schaltung eines ansteckbaren Meßwiderstandes mit mehreren Meßbereichen.

0,15;	0,3;	0,75	Amp.	der	erste	mit	4	Klemmen;
1,5;	3;	7,5	„	„	zweite	„	4	„
15;	30		„	„	dritte	„	3	„
75			„	„	vierte.			
150			„	„	fünfte.			

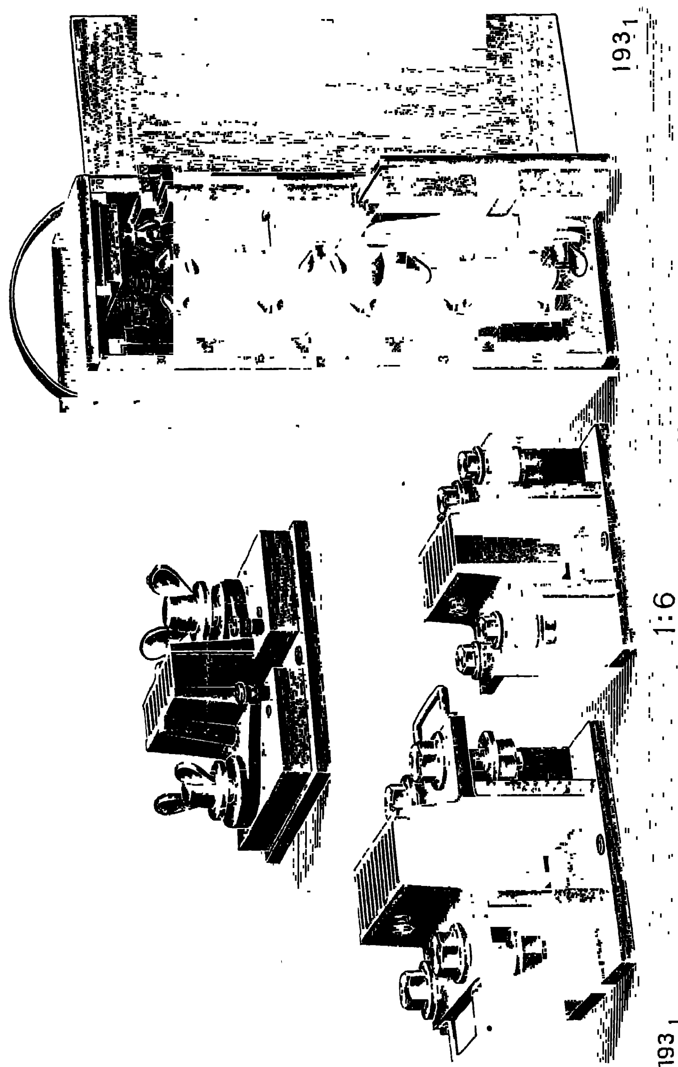


Fig. 13. Tragbare Meßwiderstände für starke Ströme von Hartmann & Braun.

Für stärkere Ströme werden die Meßwiderstände von Siemens & Halske auf Holzsockeln ausgeführt, wie Fig. 10 zeigt, sie sind für 300, 750, 1500 und 3000 Amp. Bei diesen Meßwiderständen müssen dann besondere Zuleitungen zum Instrument benutzt werden. In Fig. 11 ist die Anschlußweise der beiden Arten von Meßwiderständen besonders dargestellt.

Die schon erwähnte Fig. 12 zeigt die innere Schaltung eines Meßwiderstandes zum Anstecken. *a* und *b* sind die Anschlüsse der Leitung, in welcher der Strom gemessen werden soll. Die Leitung *b* wird immer an die Klemme 4 angeschlossen, die Leitung *a* je nach der vorhandenen Stromstärke an eine der drei Klemmen 1, 2, 3. Beim Anschluß an 3 würde der stärkste Strom, für den der Meßwiderstand bestimmt ist, gemessen werden, weil dort der Widerstand (zwischen 4 und 3) den geringsten Wert hat, beim Anschluß von *a* an 1 ist der Widerstand (zwischen 4 und 1) am größten, folglich ist die Klemme 1 für den schwächsten Strom. Die Schaltung in Fig. 11 entspricht derjenigen des ersten und zweiten der Meßwiderstände in Fig. 9.

In Fig. 13 sind einige Meßwiderstände für starke Ströme 750, 1500 und 3000 Amp. nebst einem Transportkasten mit 8 Meßwiderständen für 1,5; 3; 7,5; 15; 30; 75 usw. dargestellt, wie sie die Firma Hartmann & Braun für ihre Drehspulinstrumente ausführt. Die Starkstromleitungen müssen bei den großen Strömen genügende Fläche am Anschluß erhalten, daher sind auch mehrere Anschlußschrauben bei den Widerständen für 1500 und 3000 Amp. Bei mangelhaftem Anschluß der Hauptleitung können Fehler bis zu 0,2 % entstehen. Die Verbindungsleitungen zum Instrument werden an die in der Figur sichtbaren kleinen Schrauben angeschlossen.

Die Ausführungen der Drehspulinstrumente sind außerordentlich vielseitig und den verschiedensten Bedürfnissen angepaßt. Als Beispiel diene ein Aperiodischer Normal-Strommesser von Hartmann & Braun, Fig. 14, welcher 7 Meßbereiche besitzt. Die dafür nötigen Schaltungen und Anschlüsse sind, wie fast immer bei dieser Firma, auf dem heruntergeklappten Deckel angegeben. Die Meßwiderstände für 5, 10, 20, 50, 100, 200 liegen im Instrument und für die Anschlüsse werden die linke Flügelschraube oben auf dem Instrument und die rechts seitlich oben befindliche kleine Klemme benutzt bei 5, 10 und 20 Amp. Bei 50 und 100 Amp. wird statt an der seitlichen an die rechte Flügelschraube oben angeschlossen und bei 200 Amp. wird die linke und die mittlere

Flügelschraube oben benutzt. Für das siebente Meßbereich kann dann ein außen anzuschiebender Meßwiderstand benutzt werden, wie die Figur zeigt. Von diesem müssen Verbindungsleitungen zu den beiden kleinen Klemmen oben auf dem Instrument führen. Außerdem muß für die einzelnen Meßbereiche der auf der rechten Seite unten angebrachte Umschalter besonders eingestellt werden.

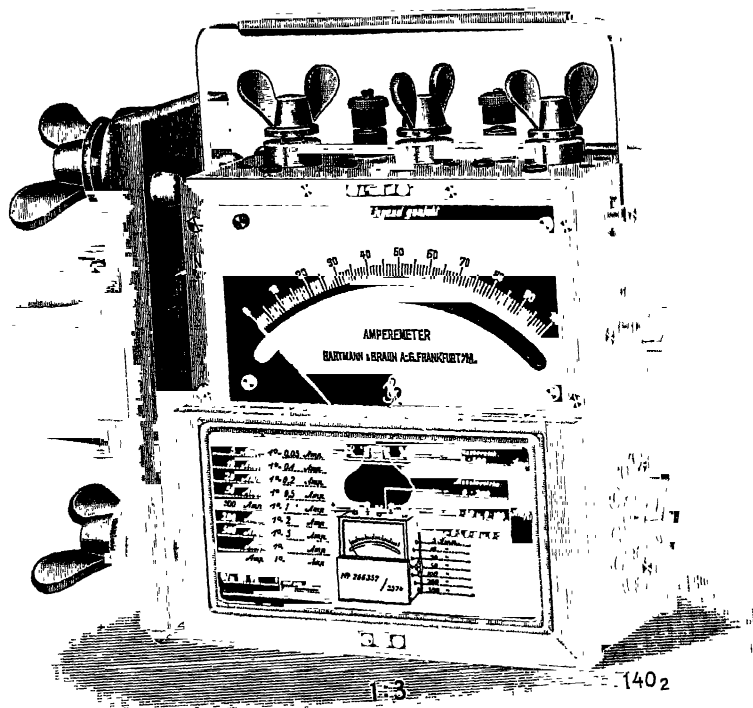


Fig. 14. Drehspulstrommesser von Hartmann & Braun für 7 Meßbereiche.

Andere Firmen führen ebenfalls Instrumente mit mehreren Meßbereichen aus.

Eine besonders bei Maschinenmessungen vorkommende zweckmäßige Verwendung der Meßwiderstände zeigt Fig. 15. Man kann in die verschiedenen Teile des Stromkreises mehrere Meßwiderstände einschalten, in Fig. 15 liegt s_1 im äußeren Stromkreis, s_2 im Magnetkreis einer Maschine. Die Meßwiderstände werden

vor Inbetriebsetzung eingeschaltet und bleiben während der Dauer der Messung in der Leitung. Sobald eine Ablesung gemacht werden soll, bei Dauerversuchen an Maschinen, die meist 6 Stunden dauern, z. B. alle Stunden, wird das Instrument nacheinander

Fig. 15. Mehrfache Strommessung mit einem Instrument.

an die Meßwiderstände angeschlossen und abgelesen. Nach der Ablesung wird das Instrument, mit dem man auf diese Weise mehrere Maschinen gleichzeitig prüfen kann, wieder abgeschaltet.

Die Drehspul-Instrumente sind außer für die bisher hauptsächlich erwähnten Strommessungen auch für Spannungsmessungen sehr brauchbar. Gewöhnlich lassen sich gleich dieselben Instrumente, die als Strommesser verwendbar sind, in anderer Schaltung als Spannungsmesser benutzen.

Wenn das Instrument genügenden Widerstand besitzt, d. h. wenn bei der Spannung, an die es angeschlossen ist, nur so viel

Fig. 16. Schaltung von Voltmetern.

Strom hindurchgeht, als es verträgt, dann wird es einfach wie V_2 in Fig. 16 angeschlossen, sonst müssen die Voltmeter einen Vorschaltwiderstand R wie V_1 in Fig. 16 erhalten. Für die Größe des Vorschaltwiderstandes ergibt sich, wenn i der zulässige Strom im Instrument ist, E die Spannung, die gemessen werden soll, g der Widerstand des Instruments:

$$R = \frac{E}{i} - g \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Beispiel: Mit einem Instrument von Siemens & Halske, welches für Spannungsmessungen eine besondere Anschlußklemme besitzt und dann schon bei 3 Milliampere den Endausschlag ausführt sowie einen Widerstand von 1000 Ω besitzt, sollen 150 Volt gemessen werden.

$$R = \frac{150}{0{,}003} - 1000 = 49000\ \Omega.$$

Gewöhnlich erhalten die Vorschaltwiderstände mehrere Meßbereiche und sind dann nach Fig. 17 geschaltet. Berechnungen

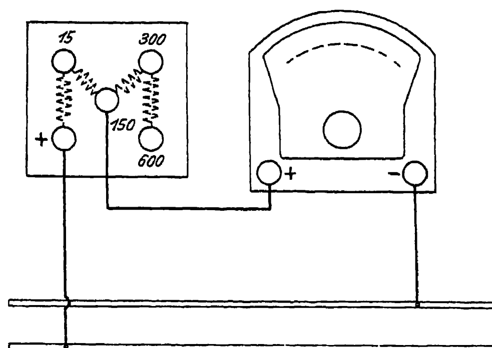


Fig. 17. Voltmeter mit Vorschaltwiderstand für mehrere Meßbereiche.

sind auch hier nicht nötig, weil immer neben jeder Klemme die höchste meßbare Spannung steht, die den Endausschlag hervorruft. Hat das Instrument 150 Teilstriche (manche Instrumente haben auch 100) und ist der Anschluß wie in Fig. 17, so ist ein Teilstrich 1 Volt, also 110 Teilstriche Ausschlag bedeuten 110 Volt. Beim Anschluß an die 600 Voltklemme würden 150 Teilstriche 600 Volt entsprechen, also derselbe Ausschlag wie vorhin, 110 Teilstriche, entspräche dann 440 Volt.

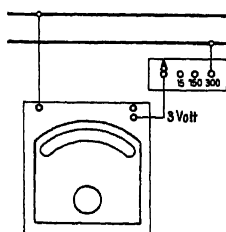


Fig. 18. Drehspulvoltmeter mit Vorschaltwiderstand. Siemens & Halske.

In Fig. 18 ist die Anschlußart für die Drehspulvoltmeter von Siemens & Halske bei Verwendung eines besonderen Vorschaltwiderstandes dargestellt. Das Äußere solcher Vorschaltwiderstände zeigt Fig. 19.

Die besonderen Eigenschaften der Drehspulinstrumente mögen zum Schluß noch kurz zusammengestellt werden. Die Instrumente

sind nur für Gleichstrom verwendbar. Ihre Angaben sind unabhängig von der Temperatur, weil die Einflüsse derselben auf die Aluminiumspule durch Vorschaltwiderstände aus Manganin ausgeglichen wird. Ihre Teilung ist vollkommen gleichförmig. Sie sind unempfindlich gegen Beeinflussung durch äußere Felder, hervorgerufen durch in der Nähe befindliche Gleichstrommaschinen, Starkströme und in Bewegung begriffene Eisenmassen (Laufkräne, Lokomotiven). (Bei Maschinen mit drehenden Magnetfeldern kann die Drehspule des Instrumentes durch Streufelder induziert werden; solche Maschinen sind aber nur Wechselstrommaschinen, für welche die Instrumente nicht benutzt werden können.) Weitere Eigenschaften sind noch leichte Handhabung, einfache Ablesung, vorzügliche Dämpfung und eine gewisse Unabhängigkeit von einer vorgeschriebenen Lage, d. h. es braucht das Instrument, wenn es liegend geeicht wurde, nicht gerade wagerecht liegend benutzt zu werden; schließlich ist es bei seinem geschlossenen starken Magnetfeld auch vom Erdmagnetismus unabhängig.

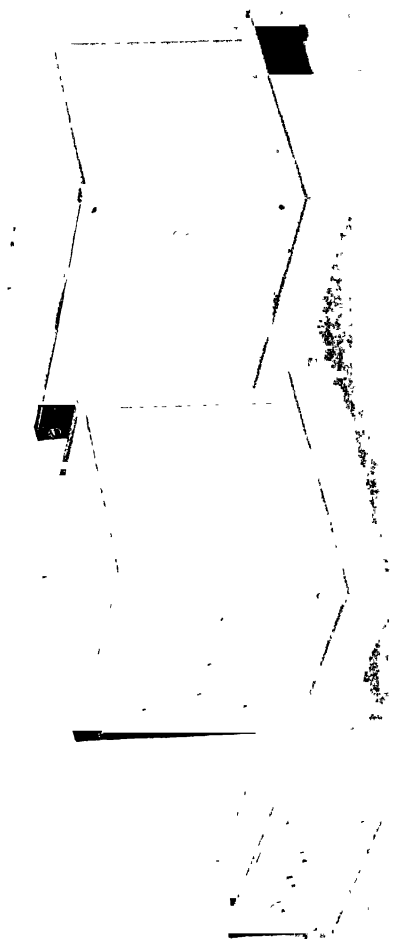


Fig. 19. Vorschaltwiderstände für Spannungsmessung von Siemens & Halske.

Elektrodynamische Instrumente.

Die dynamischen Instrumente beruhen auf der gegenseitigen Einwirkung zweier stromdurchflossener Leiter, von denen der eine fest, der andere beweglich angeordnet ist. Da diese Leiter sowohl bei Gleichstrom als bei Wechselstrom aufeinander einwirken, so können auch die dynamischen Instrumente für Gleich- und Wechselstrom benutzt werden. Sie dienen aber hauptsächlich für Wechselstrom, weil für Gleichstrom die Drehspul-Instrumente genügen und auch noch nicht übertroffen wurden. In Fig. 20 sind die wesentlichen Teile eines dynamischen Instrumentes etwas vereinfacht dargestellt, wie es Hartmann & Braun für Strom- und Spannungsmessungen ausführen. a ist die feste, b die drehbare Spule. Beide sind hintereinander geschaltet, so daß derselbe Strom J hindurchfließt. In der Ruhe liegen beide Spulen aufeinander, fließt Strom hindurch, so stoßen sie sich ab. Die Kraft, mit der die Abstoßung erfolgt, ist proportional J^2, aber gleichzeitig auch eine Funktion der Lage der Spulen zueinander, also der Verdrehung α, derartig, daß sie mit wachsendem α kleiner wird. Durch die eigenartige Form der Spulen wird erreicht, daß infolge der vorhin erwähnten entgegengesetzten Einwirkungen, zunehmende Abstoßung mit J^2 und Abnahme mit α, die Drehkraft annähernd proportional mit J wird. Da man außerdem als Gegenkraft ein Metallband benutzt, dessen Verdrehungswiderstand wie bei einer Feder genau proportional α ist, so wächst auch der Ablenkungswinkel α selbst ziemlich genau proportional mit dem Strom J. Nur im Anfang der Teilung bis zu 4% des Höchstwertes ist sie ungenau und eng, für den allergrößten Teil der Skala ist sie aber bei den Amperemetern und Voltmetern der Firma Hartmann & Braun praktisch vollkommen gleichförmig. Ein derartiges Milliamperemeter bis 15 Amp. beginnt z. B. bei 0,05 Amp., von da bis 1 Amp. sind die Teilstriche noch etwas eng, aber schon von 1 Amp. an wird die Teilung in $^1/_{10}$ Amp. ausgeführt bis 15 Amp. ganz gleichmäßig.

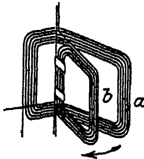


Fig. 20. Dynamisches Instrument nach Bruger von Hartmann & Braun.

Wie aus Fig. 20 hervorgeht, sind die Spulen ganz flach. Die feste Spule, welche länger ist als die bewegliche, ist umgebogen, so daß bei größeren Ausschlägen die kurze Spulenseite auf die

vordere Seite der beweglichen Spule schwach anziehend wirkt, während die Seiten *a* und *b* sich abstoßen, weil in ihnen die Ströme entgegengesetzt sind, während sie in der kurzen Spulenseite der festen und der vorderen der beweglichen Spule gleiche Richtung haben.

Die Meßgeräte sind in feste Holzkästen mit Wasserwage und Stellschrauben, wie Fig. 21 zeigt, eingebaut. Die bewegliche Spule ist zusammen mit dem Zeiger und dem gleichzeitig als Gegengewicht dienenden Dämpferflügel an einem kurzen Metallband tragsicher aufgehängt und unten durch eine Drahtachse in einem

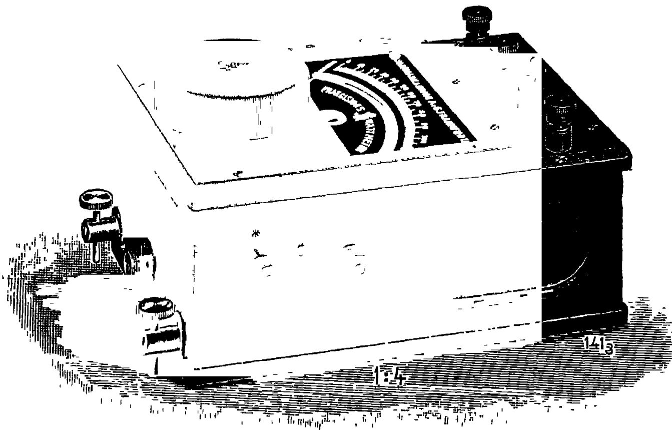


Fig. 21. Zeiger-Elektrodynamometer nach Bruger von Hartmann & Braun.

fein gelochten Edelstein reibungslos geführt, wodurch eine sehr hohe Empfindlichkeit bei sicherer Einstellung erzielt wird. Durch Beseitigung aller Metallmassen in der Nähe der wirksamen Felder und durch geeigneten Aufbau des Meßgerätes sind die bei Wechselstrom leicht auftretenden Störungen durch Induktion vermieden. Eine wirksame Luftdämpfung bewirkt eine nahezu aperiodische Einstellung des Zeigers.

Die Dynamometer für Strom- und Spannungsmessungen werden sowohl mit einer Drehspule wie auch als astatische Meßgeräte mit zwei Drehspulen ausgeführt. Im letzten Fall werden beide Drehspulen auf entgegengesetzten Seiten der Achse angeordnet

und so geschaltet, daß Störungen durch fremde Magnetfelder beide Drehspulen entgegengesetzt beeinflussen und sich aufheben.

Im allgemeinen dienen die Instrumente zum Messen schwächerer Ströme, sie werden bis zu 5 Ampere ausgeführt, können aber Meßwiderstände (vgl. Fig. 8) erhalten für 10 und 50 Ampere. Die astatischen Dynamometer können nicht mit Meßwiderständen verwendet werden, werden aber bis zu 25 Ampere geliefert. Der Spannungsmeßbereich der Instrumente wird bis zu 240 Volt angegeben. Durch Vorschaltwiderstande (vgl. Fig. 16, R) läßt sich das Meßbereich noch erweitern. Die Instrumente sind sehr empfindlich und sehr genau, ihre Angaben sind auf etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$% des Skalenendwertes genau und für Wechselstrommessungen sind sie wohl zurzeit die genauesten und empfindlichsten Instrumente.

Die dynamischen Instrumente eignen sich auch zu Messungen der Leistung. Schaltet man die feste Spule nach Fig. 25, I mit ihren Klemmen $A_1 A_2$ wie ein Amperemeter in die Leitung, so daß der Strom J hindurchgeht, während die bewegliche Spule mit einem Vorschaltwiderstand im Instrument oder bei höheren Spannungen noch mit einem besonderen Vorschaltwiderstand V nach Fig. 25, II vermittels ihrer Klemmen $e_1 e_2$ wie ein Voltmeter angeschlossen wird, so daß die Spannung E zwischen den Leitungen auf die bewegliche Spule wirkt, so heißt das Instrument Wattmeter.

Die Wirkungsweise des **dynamischen Wattmeters** erklärt folgende Überlegung: In der festen Spule fließt der Strom J, in der beweglichen oder Spannungsspule fließt der Strom $i = \frac{\Sigma R}{E}$, wobei ΣR der Widerstand der beweglichen Spule mit ihren Vorschaltwiderständen (im Instrument oder außerdem außen) bedeutet. Versteht man unter J_1 und i_1 die Augenblickswerte, so üben beide Spulen in jedem Augenblicke die Kraft aufeinander aus

$$k = C_1 \cdot J_1 \cdot i_1$$

worin C_1 eine Konstante ist, wenn kein Eisen im Instrument verwendet wird, denn die Kraftwirkung erfolgt durch die Felder der Ströme und diese sind nur bei Abwesenheit von Eisen proportional den Strömen. Bei periodisch verlaufenden Strömen und bei genügendem Trägheitsmomente der beweglichen Spule wird

$$K = \frac{C_1 (J_1 \cdot i_1 + J_2 \cdot i_2 + J_3 \cdot i_3 + \cdots + J_n \cdot i_n)}{n} \quad \text{oder}$$

$$K = \frac{C_1 \Sigma_0^n J \cdot i}{n}$$

setzt man hierin $n = \infty$ und multipliziert die rechte Seite der Gleichung im Zähler und im Nenner mit der unendlich kleinen Zeit dt, so wird

$$K = \frac{C_1 \int_0^T J \cdot i \cdot dt}{T},$$

wobei T die Zeitdauer einer Periode des Wechselstromes ist. Bei einem dynamischen Meßinstrumente, dessen bewegliche Spule um eine Achse drehbar angeordnet ist und bei dem die Gegenkraft gegen die Kraft K der Spulen durch Federn geleistet wird, liefern die Federn bei einer Verdrehung α die Gegenkraft $C_2\alpha$, worin C_2 der Verdrehungskoeffizient der Federn ist. Für eine beliebige Ablenkung α gilt bei Ruhe des Zeigers die Gleichung

$$C_2 \cdot \alpha = K = \frac{C_1 \int_0^T J \cdot i \cdot dt}{T};$$

daraus folgt durch Zusammenfassen der Konstanten C_1 und C_2 und durch Einsetzen von $i = \frac{E}{\Sigma R}$ für den Ausschlag:

$$\alpha = \frac{C_3 \int_0^T J \cdot \frac{E}{\Sigma R} \cdot dt}{T}$$

faßt man noch weiter C_3 und ΣR zu der Konstanten C zusammen, so wird

$$\alpha = \frac{C \int_0^T \cdot J \cdot E \cdot dt}{T}.$$

Der Ausdruck $\int_0^T \cdot J \cdot E \cdot dt$ ist die Arbeit während der Zeitdauer T einer Periode und diese Arbeit durch die Zeit T geteilt, ist die Arbeit in der Zeiteinheit oder die Leistung A. Es wird also

$$\alpha = C \cdot A,$$

woraus sich ergibt, daß ein solches Wattmeter bei der geeigneten Ausführung eine gleichmäßige Teilung erhält, was auch bei allen dynamischen Wattmetern der Fall ist.

Ein Wattmeter nach Bruger mit astatischen Drehspulen von Hartmann & Braun zeigt Fig. 22. Diese Instrumente besitzen eine geteilte feststehende Hauptstromspule S und zwei auf gemeinsamer Achse übereinander angebrachte bewegliche, ⅂_-förmig gebogene, flache Spannungsspulen $s_1 s_2$. Die untere Spannungsspule ist die hauptsächlich wirksame, die obere verstärkt die Wirkung der anderen noch etwas, sie dient aber viel mehr zur Be-

seitigung des störenden Einflusses fremder Felder, so daß das Meßgerät astatisch wird. Die Aufhängung der beweglichen Spulen mit Zeiger und Dämpferflügel ist in gleicher Weise wie bei den vorhin beschriebenen Dynamometern nach Bruger ausgeführt, denen die Wattmeter auch in ihrer äußeren Form gleichen. Die geteilte Hauptstromspule kann mit Einrichtung zum Parallel- oder Hintereinanderschalten beider Spulenhälften versehen werden, ähnlich wie bei Fig. 29. Es ergeben sich dann zwei Strom-Meßbereiche, die sich wie 1 : 2 verhalten.

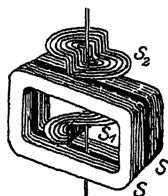


Fig. 22. Wattmeter nach Bruger von Hartmann & Braun.

Auch diese elektrodynamischen Leistungsmesser von Hartmann & Braun zeichnen sich durch große Genauigkeit und Empfindlichkeit aus und sind besonders zur Messung sehr kleiner Leistungen geeignet. Sie werden bis zu 30 Ampere ausgeführt und erhalten bis zu 220 Volt die nötigen Vorschaltwiderstände im Instrument. Außerdem können Vorschaltwiderstände für 400, 600, 1000 und 1500 Volt und unter Umständen noch höher geliefert werden. Die Vorschaltwiderstände sind induktions- und kapazitätsfrei und die Angaben der Instrumente sind frei von Beeinflussung durch Temperaturschwankungen. Instrument und Vorschaltwiderstände vertragen beträchtlichen Überstrom, so daß man diese Leistungsmesser auch bei starker Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung benutzen kann.

Für die Ausführung von Wattmetern und dynamischen Wechselstrom-Instrumenten überhaupt müssen noch folgende Umstände beachtet werden: Strom und Spannung und mit ihnen auch die durch sie erzeugten Felder sind bei Wechselstrom veränderliche Größen. Es dürfen daher in den magnetischen Kreisen der Spulen keine Eisenteile vorhanden sein, da sonst die Felder infolge der auftretenden Hysteresis einen anderen periodischen Verlauf haben würden als Strom und Spannung. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft führt allerdings für technische Messungen Schalttafel-Wattmeter aus, die im Gegensatz zu vorstehender Behauptung sogar viel Eisen enthalten, die feste Spule ist in Eisen eingebettet und innerhalb der Drehspule befindet sich noch ein Eisenzylinder, der wie die anderen Teile aus Blechen besteht, damit durch die Wechselfelder keine schädlichen Wirbelströme entstehen. Ein Nachteil der dynamischen Instrumente ohne Eisen

ist das schwache Drehmoment der Stromfelder und die dadurch bedingte, möglichst leicht zu haltende und sorgfältig mit Spitzen in Steinen zu lagernde bewegliche Spule. Ferner sind sie gegen äußere Felder sehr empfindlich. Sowie man Eisen in das Instrument bringt, verstärkt man natürlich das Drehmoment der Spulen beträchtlich und braucht das bewegliche System nicht so außerordentlich fein und leicht auszuführen, ohne daß man an Empfindlichkeit einbüßt. Auch wird durch das viel stärkere Feld der Einfluß äußerer Felder viel geringer. Nach Veröffentlichungen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft über diese ferrodynamischen Wattmeter verstärkt die Anwendung von Eisen das Stromdrehmoment um das Doppelte des bisher üblichen. Voraussetzung ist aber ein relativ großer Luftspalt bei viel Eisen, möglichst kurzem Eisenweg und hoher Strombelastung der festen Spule, damit der Einfluß von Hysteresis und Remanenz klein bleibt, was dann der Fall ist, wenn die gesamten Amperewindungen groß sind gegen diejenigen, die der Eisenweg allein gebrauchen würde, bei der gleichen Magnetisierung. Ferner wird gegen die Verwendung von Eisen der Grund angeführt, daß das Feld nicht mehr in Phase mit dem Erregerstrom ist. Diese Phasenverschiebung, verursacht durch Hysteresis und Wirbelströme im Eisen, ist um so größer, je größer die im Eisen verlorene Energie gegenüber den wattlosen Voltampere der Spule ist. Es ist der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft gelungen, solche ferrodynamische Wattmeter auszubilden, die einen durch das Eisen bedingten Phasenfehler von nur 0,3 % des Gesamtausschlages besitzen, der für Schalttafelinstrumente belanglos ist und sogar durch Vorschaltung einer kleinen Selbstinduktion in die Spannungsspule oder durch Parallelschaltung einer Drosselung zur Stromspule vollkommen aufgehoben werden kann. Die Firma führt diese ferrodynamischen Instrumente als Amperemeter, Voltmeter und Wattmeter aus, aber nicht als Präzisionsinstrumente, sondern nur für Schalttafeln und als Registrier-Instrumente.

Auch die Firma Siemens & Halske führt neuerdings dynamische Instrumente als Wattmeter, Volt- und Amperemeter sowie als Phasenmesser aus, welche ein mit Ausnahme des Luftspaltes für die Drehspule geschlossenes Eisensystem aus legierten Blechen besitzen, aber auch nur für Schalttafeln.

Für die Präzisionsinstrumente nach dynamischem Prinzip, d. h. solche Instrumente, die man bei Messungen und Untersuchungen

an Maschinen, Apparaten u. dgl. auf Prüffeldern und in Laboratorien benutzt, verwenden die Firmen im allgemeinen alle kein Eisen, wie ja die Instrumente nach Bruger von Hartmann & Braun, Fig. 20, 21 und 22, und auch die nachstehend beschriebenen zeigen. Als Grund gegen das Eisen wird die dadurch verursachte Phasenverschiebung zwischen Feldern und Strömen angegeben.

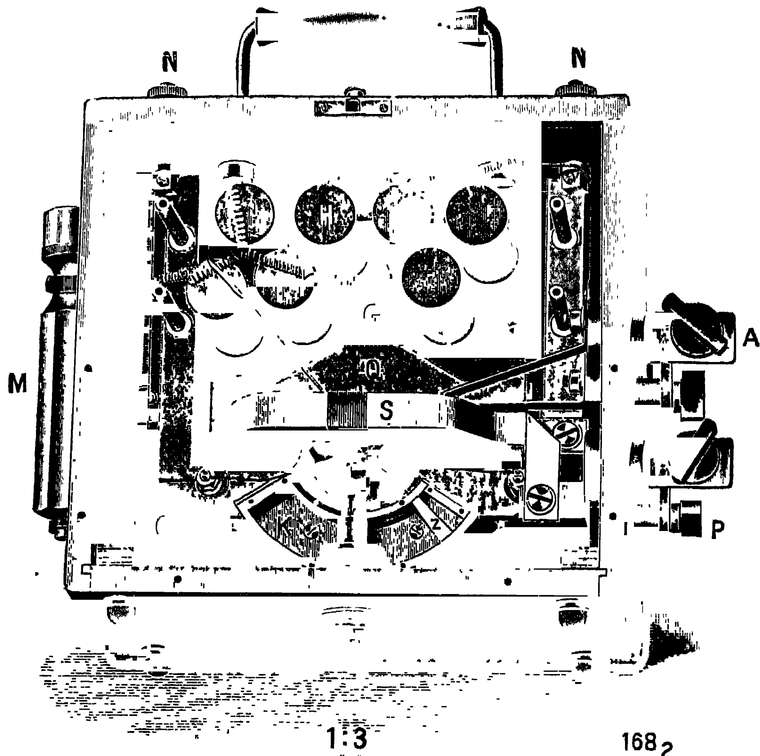


Fig. 23. Dynamometrisches Wattmeter von Hartmann & Braun. Innenansicht.

Weiter müssen Wirbelströme, die die Wechselfelder erzeugen könnten, vermieden werden, indem man massive Metallmassen vermeidet und unvermeidliche, wie die Stromspule selbst, die bei stärkeren Strömen größeren Querschnitt haben muß, richtig unterteilt. Weiter können noch die gegenseitige Induktion der beiden

Spulen und die Selbstinduktion der beweglichen Spule Fehler hervorrufen sowie Temperaturschwankungen, die Einfluß auf die Verdrehungskraft der Federn und auf die Widerstände der Spulen haben. Durch geeignete Materialien und andere Mittel kann man alle diese Fehlerquellen vermeiden.

Fig. 23 zeigt das Innere eines dynamischen Wattmeters von Hartmann & Braun. Das ganze Instrument ist auf eine Grundplatte G aus vorzüglichem Isoliermaterial montiert, welche sehr kräftig ausgebildet und durch Rippen so versteift ist, daß Veränderungen mit Sicherheit ausgeschlossen sind. Die feste Spule S ist durch einen Kloben Q aus Isoliermaterial an der Grundplatte befestigt. Die bewegliche Spule befindet sich im Inneren der festen Spule und sitzt auf einer Achse aus Stahl, deren gut gehärtete Spitzen in Saphirsteinen gelagert sind. Letztere werden von zwei in die feste Spule hineinragenden Armen getragen. Diese Arme ihrerseits stehen in starrer Verbindung mit der Luftdämpferkammer K, deren Deckel in Fig. 23 abgenommen ist. Auf der Achse der beweglichen Spule sind noch die Torsionsfedern, der Zeiger und diesem gegenüber ein Arm mit dem Luftdämpferflügel Z angebracht. Durch diese symmetrische Anordnung ist geringstes Gewicht des beweglichen Systems gewährleistet. Auf dem oberen Teile der Grundplatte G ist eine Anzahl Holzspulen H sichtbar, auf denen der Vorschaltwiderstand für den Spannungskreis, soweit derselbe, ohne daß zu große Wärmeentwickelung hervorgerufen wird, im Instrument untergebracht wurden kann, bifilar aufgewickelt ist; außerdem kann noch ein weiterer Teil des Vorschaltwiderstandes in einem besonderen Raum hinter der Grundplatte G eingebaut werden. Die Skala nebst dem Träger für den Spiegelbogen, der zur Vermeidung von Ablesefehlern durch Parallaxe hinter der Skala angebracht ist (vgl. Fig. 14), sind in Fig. 23 nicht vorhanden, sie werden auf den neben den Holzspulen sichtbaren 4 Stiften befestigt. Das ganze Wattmeter ist ähnlich wie das Instrument Fig. 14 in ein Gehäuse aus poliertem Nußbaumholz eingesetzt. An der rechten Seite dieses Gehäuses treten die Zuführungsklemmen A zur festen Spule und bei Wattmetern mit mehreren Strommeßbereichen die Umschaltvorrichtung dafür hervor, während oben neben dem Traggriff die Spannungsklemmen N sichtbar sind; an der unteren Seite ist die Vorrichtung J zur Einstellung des Zeigers auf Null sichtbar.

Sowohl die feste als auch die bewegliche Spule sind frei von Eisen, so daß Verzerrungen der Felder durch Hysteresis ausgeschlossen sind. Die feste Spule S ist für jede beliebige Stromstärke aus dünnem Kupferband so hergestellt, daß zwischen je zwei aufeinander liegenden Bändern eine Papierzwischenlage untergebracht ist, wodurch Wirbelströme in den Kupfermassen der Spule vermieden sind. Bei Wattmetern für niedrige Stromstärken ist das Kupferband fortlaufend gewickelt, so daß sämtliche Windungen hintereinander geschaltet sind. Bei höheren Stromstärken werden, je nach der Größe derselben, mehrere Bänder gleichzeitig aufgewickelt, so daß auch bei Wattmetern für sehr starke Ströme immer die gleiche Unterteilung der Kupfermassen vorhanden ist, Wirbelströme also nicht entstehen können. Die Anordnung der festen und beweglichen Spulen ist so getroffen, daß bei möglichst großem Drehmomente doch nur ein verhältnismäßig kleines magnetisches Feld durch die bewegliche Spule erzeugt zu werden braucht, wodurch der Strom in dieser Spule und auch deren Windungszahl entsprechend niedriger gehalten sein können. Durch diesen Umstand ist aber der Forderung, daß die Selbstinduktion des Spannungskreises möglichst klein, der Ohmsche Widerstand dagegen möglichst groß sein soll, Rechnung getragen. Der Wert des Selbstinduktionskoeffizienten der beweglichen Spule ist nur 0,0045 Henry und der Strom im Spannungskreis ist bei den transportabeln Wattmetern bei normaler Höchstspannung 0,03 Ampere. Rechnet man mit diesen Werten die durch Selbstinduktion erzeugten Fehler (vgl. später, zweiter Abschnitt) für z. B. 100 Polwechsel und 120 Volt aus, so wird der Fehler selbst für die hohe Phasenverschiebung von 80 Grad noch nicht $\frac{1}{4}$% vom Sollwert erreichen. Da bei so hohen Phasenverschiebungen das Instrument nur in den unteren Teilen der Skala benutzt wird, so liegt der vorgenannte Fehler innerhalb der Ablesegenauigkeit und die Angaben des Wattmeters brauchen nicht korrigiert zu werden. Auch die gegenseitige Induktion der festen und der beweglichen Spule aufeinander ist hier so gering, daß bemerkbare Fehler durch sie nicht hervorgerufen werden. Das Material für die Torsionsfedern ist so gewählt worden, daß die Änderung der Elastizität derselben mit den Temperaturschwankungen auf ein Minimum gebracht worden ist. Der nicht zu beseitigende Rest und andere Temperaturabhängigkeiten sind durch eine selbsttätig wirkende Widerstandskombination kompensiert. Abmessungen und Formen der Spulen

sind so ausgebildet, daß die Teilung der Skala vollkommen gleichmäßig ist. Die Eichung erfolgt empirisch. Bei Instrumenten mit mehreren Meßbereichen erfolgt die Umschaltung durch Schrauben und Laschenverbindung und nicht durch Stöpsel, um Fehler durch Übergangswiderstände zu vermeiden. Für Spannungen bis 250 Volt sind die Vorschaltwiderstände direkt in das Innere des Gehäuses eingebaut, für höhere Spannungen werden besondere Vorschaltwiderstände benutzt. Die Wattmeter werden für Stromstärken bis 400 Ampere gebaut. Für höhere Stromstärken kommen bei Gleichstrom Meßwiderstände, bei Wechselstrom Stromwandler (vgl. Fig. 25 III) in Anwendung, da hier Meßwiderstände Fehler veranlassen würden. Die Stromwandler, über welche noch genauer gesprochen werden soll, sind ganz besonders für diesen Zweck konstruiert, da es bei Wattmetern darauf ankommt, daß die Stromwandler ganz bestimmte Eigenschaften, wie genaues Umformen der Phase, genaue Proportionalität zwischen Primär- und Sekundärstrom, gleiche Stromkurven von Primär- und Sekundärstrom, Unabhängigkeit von der Periodenzahl usw. haben.

Um in höheren Spannungen die Wattmeter von der Hochspannung abzutrennen, verwendet man nicht nur Strom-, sondern auch Spannungswandler. Die Beseitigung der Hochspannung im Instrumente selbst empfiehlt sich nicht nur wegen ihrer Gefahr, sondern auch zur Vermeidung von statischen Ladungen, welche ein Wattmeter vollkommen falschzeigend machen können, da hierdurch auf das bewegliche System des Wattmeters Kräfte ausgeübt werden. Genaueres hierüber soll im Abschnitt II gesagt werden.

Die dynamischen Instrumente von Siemens & Halske, die auch als Amperemeter, Voltmeter und Wattmeter geliefert werden, sind nach Fig. 24 ausgeführt. Die rechteckige Spannungsspule umfaßt die runde feste Spule. Die Amperemeter werden für schwächere Ströme bis 0,5 Ampere mit 1 Meßbereich, für stärkere Ströme 200 Ampere mit 2 Meßbereichen ausgeführt. Die Voltmeter sind direkt für 600 Volt. Für höhere Spannungen und Ströme benutzt man Vorschaltwiderstände und Spannungs- oder Stromwandler. Ampere- und Voltmeter sind von etwa einem Fünftel des Meßbereiches an fast gleichförmig geteilt, die Wattmeter haben eine fast über den ganzen Bereich der Skala reichende gleichmäßige Teilung. Sämtliche Präzisions-Wattmeter haben zwei Strommeßbereiche und erhalten bis 25 Ampere Stöpselum-

schaltung, bei höheren Stromstärken Laschenumschaltung. Um den bei allen eisenfreien dynamischen Instrumenten bei Gleichstrommessungen auftretenden Einfluß des Erdmagnetismus unschädlich zu machen, können die Instrumente mit Umschalter für den Spannungskreis versehen werden. Man macht dann zwei Messungen, indem man vor der zweiten Messung den Strom in beiden Spulen umkehrt und rechnet mit deren Mittelwert. Das Umschalten der Spannungsspule ist aber auch bei gewissen Drehstrommessungen nötig, worauf noch hingewiesen wird, und dann

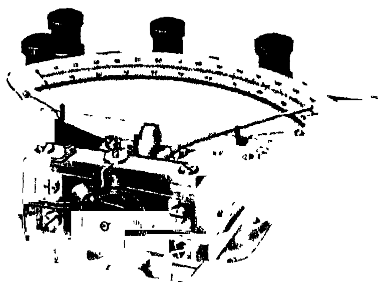


Fig. 24. Dynamisches Präzisions-Instrument von Siemens & Halske.

kann auf einfache Weise bei falschem Anschluß durch Umschalten der Spannungsspule der Zeigerausschlag nach der richtigen Seite gebracht werden. Die Wattmeter der Prüffeldtype werden nur bis zu 5 Ampere ausgeführt, da sie für höhere Ströme mit Stromwandlern zusammengeschaltet werden sollen, die Präzisionswattmeter von Siemens & Halske werden bis zu 400 Ampere geliefert.

Für alle Wattmeter im allgemeinen ergeben sich die vier Schaltungsfälle nach Fig. 25. Sind Strom und Spannung höchstens so groß, wie die für das Instrument zulässigen Höchstwerte, so führt man Schaltung Fig. 25, I aus, indem die Stromspule mit den Klemmen $A_1 A_2$ unmittelbar wie ein Amperemeter in die Leitung geschaltet wird, während die Spannungsspule mit den Klem-

men $e_1 e_2$ an die Spannung des Kreises gelegt wird. Für höhere Spannungen benutzt man Vorschaltwiderstände V nach Fig. 25, II, welche gewöhnlich wie die der Voltmeter für mehrere Meßbereiche ausgebildet sind, so daß bei Anschluß an Klemme 4 die höchste Spannung gemessen werden kann, bei 3 eine geringere und bei 2 noch weniger. Häufig werden noch weit mehr Stufen auf dem

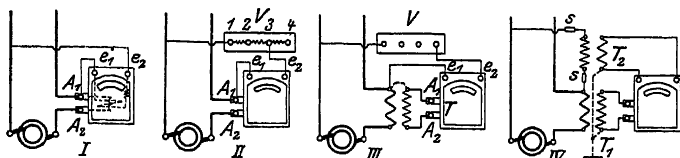


Fig. 25. Verschiedene Wattmeterschaltungen.

Vorschaltwiderstand vorgesehen, so besitzen die größten listenmäßigen Vorschaltwiderstände von Siemens & Halske die Stufen: 60, 150, 300, 600, 1500, 3000, 4500, 6000 Volt.

Übersteigt auch der Strom den für das Wattmeter zulässigen Wert, so schaltet man nach Fig. 25, III einen Stromwandler an die Stromspule und muß bei Hochspannung, um keinen Überschlag zwischen Strom- und Spannungsspule im Wattmeter befürchten zu müssen, die Stromspule auf das Potential der Spannungsspule bringen, indem man die eine Primärklemme des Stromwandlers mit der einen Sekundärklemme durch die gestrichelt gezeichnete Leitung verbindet. In Fig. 25, IV hat die Stromspule den Stromwandler T_1 und die Spannungsspule den Spannungswandler T_2. Dieser erhält zweckmäßig Hochspannungssicherungen s auf der Hochspannungsseite und wird mit dem Stromwandler zusammen auf der Sekundärseite einpolig geerdet, wie die gestrichelte Leitung angibt.

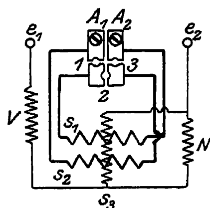


Fig. 26. Innere Schaltung eines Wattmeters von Siemens & Halske.

Die innere Schaltung eines Präzisionswattmeters der Laboratoriumstype von Siemens & Halske, welche stets zwei Strommeßbereiche besitzen, zeigt Fig. 26. Die Stromspulen sind in zwei Hälften unterteilt, welche mittels Umschalters in Reihe oder parallel geschaltet werden können. Man erhält auf diese Weise zwei Strommeßbereiche, die sich wie 1 : 2 verhalten. Die Umschal-

tung erfolgt bis zu 25 Ampere nach Fig. 26 durch Stöpsel, bei den höheren Meßbereichen durch Laschen (vgl. Fig. 29). In Fig. 26 sind $s_1 s_2$ die beiden Hälften der Stromspule, s_3 ist die Spannungsspule, die einen Vorschaltwiderstand V und einen Nebenschlußwiderstand N im Instrument besitzen. Die Umschaltung der Stromspule erfolgt mit Stöpsel in dieser Weise:

Stöpsel 2 gesteckt = niederer Strommeßbereich, beide Spulenhälften hintereinander.

Stöpsel 1 und 3 gesteckt = doppelter Strommeßbereich, beide Spulenhälften parallel.

Stöpsel 1, 2, 3 gesteckt = Stromspulen kurzgeschlossen.

Die innere Schaltung eines dynamischen Präzisions-Voltmeters der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft zeigt Fig. 27.

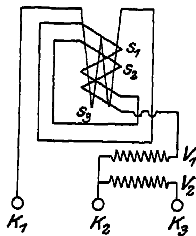


Fig. 27. Schaltung eines dynam. Voltmeters der A. E. G. mit 2 Meßbereichen.

Die Voltmeter werden für Spannungen bis 300 Volt mit zwei Meßbereichen ausgeführt, wovon 30 Volt der niedrigste ist und den Anschluß an die Klemmen $K_1 K_2$ erfordert. Es sind dann die festen Spulenteile $S_1 S_2$ mit der beweglichen Spule S_3 und dem Vorschaltwiderstand V_1 hintereinander geschaltet. Bei 300 Volt werden die Klemmen K_1 und K_3 benutzt, wobei dann zu den vorhin genannten hintereinander geschalteten Teilen noch der weitere Vorschaltwiderstand V_2 hinzutritt. Für Spannungen über 300 Volt werden besondere außen anzuschließende Vorschaltwiderstände geliefert.

Die innere Schaltung eines dynamischen Präzisions-Wattmeters derselben Firma zeigt Fig. 28. Die festen Spulenhälften $S_1 S_2$ haben je einen kleinen Vorschaltwiderstand V und die bewegliche Spule S_3 liegt im Nebenschluß zu S_2 mit seinem Vorschaltwiderstand. An K K_2 wird die Leitung angeschlossen. Für die Umschaltung gilt folgendes:

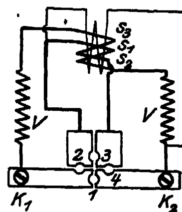


Fig. 28. Dynam. Wattmeter der A. E. G. mit Stöpselschaltung.

Stöpsel 3 gesteckt = niederer Meßbereich, $S_1 S_2$ hintereinander.

Stöpsel 2 und 4 gesteckt = doppelter Meßbereich, $S_1 S_2$ parallel.

Stöpsel 1 gesteckt = Instrument durch Kurzschluß der Stromspulen stromlos.

Für höhere Stromstärken verwendet die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft ebenfalls Laschenschaltung, wie aus Fig. 29 hervorgeht.

Wie schon wiederholt erwähnt wurde, verwendet man bei Wechselstrom zur Messung stärkerer Ströme als das Instrument verträgt Stromwandler und bei Voltmetern Spannungswandler. In Fig. 30 ist eine diesbezügliche Schaltung angegeben. Die Strom- und Spannungswandler, auch Meßtransformatoren genannt, sind für ihren Zweck besonders ausgeführte kleine Transformatoren. Die Stromwandler T_2 haben sekundär eine größere Windungszahl als primär, weil der Strom erniedrigt werden soll. Gerade umgekehrt sind die Spannungswandler sekundär mit weniger Windungen als primär ausgeführt, weil sie die Spannung erniedrigen sollen. Bei Amperemetern und Voltmetern kann man Fehler im Meßtransformator dadurch beseitigen, daß man die Instrumente mit den Transformatoren zusammen eicht. Bei Wattmetern kann aber dieselbe Leistung $J \cdot E \cdot \cos\varphi$ für verschiedene Ströme J bei entsprechend verändertem $\cos\varphi$ angezeigt werden, aus diesem Grunde müssen die Meßtransformatoren nach bestimmten Gesichtspunkten ausgeführt werden und vor allem folgende Eigenschaften aufweisen:

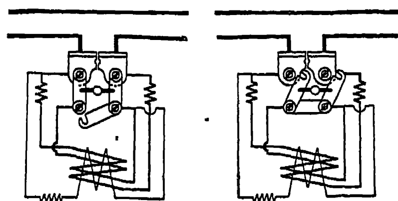


Fig. 29. Laschenschaltung bei dyn. Amperemetern der A. E. G. Links Parallel-, rechts Hintereinander-Schaltung.

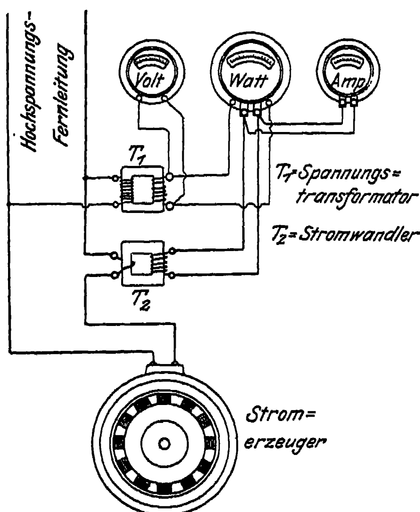


Fig. 30. Voltmeter, Amperemeter und Wattmeter bei Anschluß an Strom- und Spannungswandler.

1. Möglichste Proportionalität der sekundären Größe mit der primären.
2. Möglichst 180 ^{0} betragende Phasenverschiebung zwischen primärer und sekundärer Größe.
3. Unabhängigkeit des Übersetzungsverhältnisses von der Stromwechselzahl in weitesten Grenzen.
4. Die Kurvenform muß primär und sekundär dieselbe sein.
5. Stromtransformatoren müssen innerhalb gewisser Grenzen eine von der Belastung unabhängige sekundäre Stromstärke haben.

Man erreicht dies durch verschiedene Maßnahmen. Die erste und zweite Bedingung wird bei kleinem Spannungsverlust in den Wickelungen und durch möglichst kleine Sekundärstreuung erreicht. Zu letzterem Zweck muß man die sekundäre Wickelung innerhalb der primären, also direkt auf dem Eisen anordnen. Jede andere Anordnung ist ungünstig. Die dritte wird erfüllt bei geringer Sättigung des Eisens und Verwendung von möglichst viel und gutem Eisen. Ferner darf man besonders die Stromwandler niemals mit offenem Sekundärkreis primär anschließen. Die Stromwandler haben sekundär nur Amperemeter- oder Wattmeterstromspulen als Anschluß, also einen Kreis von so wenig Widerstand, daß er fast einem Kurzschluß gleichkommt. Bei offenem sekundären Kreis und eingeschaltetem Primärkreis tritt eine sehr starke Magnetisierung des Eisens auf. Hierdurch entsteht eine unzulässige Erwärmung und eine starke magnetische Erschütterung des ganzen Transformators. Beides kann die Konstanten des Stromwandlers ändern. Noch wichtiger ist folgendes: Unterbricht man bei offenem Sekundärkreis den Primärstrom im Augenblick der stärksten Magnetisierung, so bleibt ein ungewöhnlich starker remanenter Magnetismus im Eisen zurück, der bei den nächsten Messungen Fehler verursacht. Weiter entsteht bei den primär für starke Ströme ausgeführten Stromwandlern, die dann primär nur eine Schiene haben (vgl. Fig. 31), eine Gefahr, denn sie müssen sekundär so viele Windungen erhalten, um den Strom genügend herabzusetzen, daß bei offenem Sekundärkreis eine sehr hohe, sogar lebensgefährliche Spannung erzeugt werden kann. Bei Spannungswandlern treten diese Erscheinungen nicht auf, weil bei diesen sekundär weniger Windungen vorhanden sind und der Sekundärkreis mit den Spannungsspulen und Vorschaltwiderständen immer hohen Widerstand hat. Um die Übermagnetisierung

der Stromtransformatoren infolge offenen Sekundärkreises wieder zu beseitigen, kann man, wenn der Transformator nicht durch Erwärmung oder Erschütterung gelitten hat, das Eisen entmagnetisieren. Man läßt zu diesem Zweck bei offenen Sekundärklemmen einen Wechselstrom durch die Primärwickelung fließen, dessen Stärke man ganz allmählich von der normalen bis auf Null herab ändert. Man muß hierbei aber wegen der schon erwähnten auftretenden Hochspannung sehr vorsichtig vorgehen, damit der Transformator nicht beschädigt wird.

In folgender Tabelle sind einige Werte angegeben, die an Meßtransformatoren von Hartmann & Braun beobachtet wurden:

J_1 in % vom Höchststrom	Abweichung des Phasenwinkels zwischen J_1 und J_2 von 180°					
	induktionsfrei belastet			induktiv belastet		
	25 Perioden	50 Perioden	100 Period.	25 Perioden	50 Perioden	100 Period.
10	39′	23′	11′	36′	15′	5′
20	31′	18′	8′	27′	10′	1′
40	21′	11′	5′	16′	3′	− 4′
60	17′	8′	3′	10′	− 1′	− 7′
80	12′	6′	2′	7′	− 3′	− 8′
100	11′	5′	2′	5′	− 3′	− 8′

J_1 in % vom Höchststrom	Abweichung des Übersetzungsverhältnisses in % vom Sollwert					
	induktionsfrei belastet			induktiv belastet		
	25 Perioden	50 Perioden	100 Period.	25 Perioden	50 Perioden	100 Period.
10	− 0,4 %	− 0,3 %	− 0,2 %	− 1 %	− 0,9 %	− 0,75 %
20	− 0,2 %	− 0,15 %	− 0,05 %	− 0,9 %	− 0,75 %	− 0,6 %
40	+ 0,05 %	+ 0,15 %	+ 0,2 %	− 0,5 %	− 0,4 %	− 0,2 %
60	+ 0,3 %	+ 0,35 %	+ 0,4 %	− 0,2 %	− 0,15 %	0 %
80	+ 0,6 %	+ 0,65 %	+ 0,7 %	0 %	+ 0,05 %	+ 0,15 %
100	+ 0,7 %	+ 0,75 %	+ 0,8 %	+ 0,05 %	+ 0,15 %	+ 0,2 %

Die Werte der vorstehenden Tabelle geben ein Bild von der Größenordnung der Störungen. Aus der zweiten Tabelle erkennt man, daß die Abweichungen vom Übersetzungsverhältnis immer nur sehr gering sind. Auch die Phasenwinkel zwischen Primärstrom J_1 und Sekundärstrom J_2 beträgt bei der gewöhnlich üblichen Periodenzahl von 50 und vollem Strom nur 5′ bei induktionsfreier und − 3′ bei induktiver Belastung und bei 10 % des vollen Stromes

ist er 23′ bei induktionsfreier und 15′ bei induktiver Belastung. Es sind also die Fehler, die durch diese Störungen entstehen, sehr klein und in den meisten Fällen liegen sie sogar innerhalb der Ablesefehler, so daß man nur bei sehr genauen Messungen Korrektionen vornehmen muß.

Die Korrektionen werden nach Kurven ausgeführt, welche die Firmen gleich mitliefern. Siemens & Halske geben für ihre Präzisions-Stromtransformatoren folgende Mittelwerte an: Das Übersetzungsverhältnis ist bei 5 Ampere und einer Klemmenspannung von etwa 4 Volt auf mindestens 0,5 % genau abgeglichen und bleibt von 100 % bis 10 % der Strombelastung konstant. Die von 180° abweichende Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärstrom beträgt bei 50 Perioden für Vollast nur etwa 15 Minuten, bei 20 % der Strombelastung nicht mehr als 36 Minuten.

Als Korrektionswerte geben Siemens & Halske folgende an:

Tabelle I.

% der Belastung	Sekundärstrom	Korrektionsfaktor f bei 50 Perioden für					
		$\cos\varphi = 1$	$\cos\varphi = 0{,}9$	$\cos\varphi = 0{,}8$	$\cos\varphi = 0{,}7$	$\cos\varphi = 0{,}5$	$\cos\varphi = 0{,}3$
20	1 Amp.	1,0020	0,9980	0,9955	0,9925	0,9875	0,9745
40	2 „	1,0018	0,9985	0,9970	0,9935	0,9900	0,9800
60	3 „	1,0015	0,9990	0,9975	0,9945	0,9915	0,9830
80	4 „	1,0005	0,9990	0,9980	0,9950	0,9920	0,9850
100	5 „	1,0000	0,9990	0,9980	0,9950	0,9920	0,9865

Voraussetzung ist, daß ein Wattmeter und ein Amperemeter in Serie an den Stromtransformator angeschlossen sind. Man erhält die richtigen Meßresultate durch Multiplikation des aus der Tabelle entnommenen Wertes f mit den Angaben α der Instrumente. Für Amperemeter gelten nur die Werte für $\cos\varphi = 1$. Sind z. B. am Wattmeter 6400 Watt abgelesen, am Amperemeter 80 Ampere, am Voltmeter 100 Volt, so ist $\cos\varphi = \frac{80 \cdot 100}{6400} = 0{,}8$, bei 50 Perioden und einem Meßtransformator für 100 Ampere ergibt sich nach der vorstehenden Tabelle $f = 0{,}9980$ und die genaue Wattmeterangabe ist dann $6400 \cdot 0{,}9980 = 6387{,}2$. Es beträgt also der Unterschied zwischen den wirklichen Watt und den ohne Korrektion angegebenen nur 0,24 %, so daß in den meisten Fällen die Korrektion fortfallen kann.

Die Ausführungen der Meßtransformatoren sind sehr verschieden. In Fig. 31 ist ein Schienenstromwandler dargestellt.

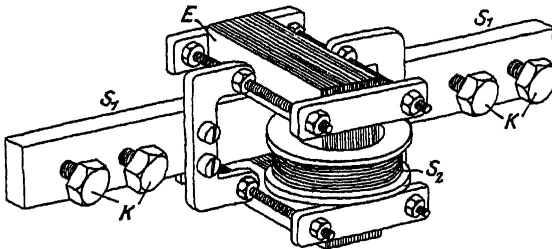


Fig. 31. Stromwandler.

S_1 ist eine Kupferschiene, die mit den Klemmen K in die Leitung geschaltet wird, deren Strom gemessen werden soll. E ist der aus Blechen aufgebaute Eisenkörper, auf dem die Sekundärspule S_2 sitzt, an deren Klemmen das Instrument, Amperemeter oder Wattmeterstromspule, angeschlossen wird.



Fig. 32. Stromtransformator mit Luftisolation. Type A. L. der A. E. G.



Fig. 33. Stromtransformator von Siemens & Halske.

Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft führt ihre Meßtransformatoren, ebenso wie Siemens & Halske für 5 Ampere stärksten Sekundärstrom aus. In Fig. 32 ist ein Stromtransformator mit Luftisolation dargestellt, welcher bis zu 600 Ampere

Primärstrom bei 1100 Volt geliefert wird. Im übrigen werden noch für wesentlich höhere Spannungen (bis 13000) Stromtransformatoren geliefert. Die größten Typen sind 13000 Volt und 1000 Ampere Primärstrom. Die Stromtransformatoren für höhere Spannungen stehen in Kästen mit Füllmasse. Die Spannungstransformatoren werden auch mit Ölisolation ausgeführt.

Fig. 33 zeigt einen Stromtransformator mit einem Meßbereich von Siemens & Halske. Oben sind die primären Anschlüsse für den starken Strom, vorne auf dem Gehäuse befinden sich die sekundären Anschlußklemmen, welche durch Stöpsel kurzgeschlossen werden können, damit das schon erwähnte gefährliche Einschalten des primären Kreises bei offenem Sekundärkreis vermieden werden kann. Rechts neben den Sekundärklemmen liegt die Erdungsklemme.

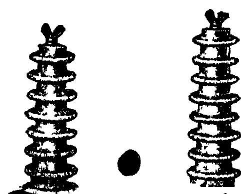


Fig. 34. Präzisions-Spannungstransformator von Siemens & Halske.

Einen Spannungstransformator mit einem bzw. zwei Meßbereichen von Siemens & Halske zeigt Fig. 34. Diese Type wird ausgeführt für maximal 15000 Volt primär, bei 100 Volt sekundär. Eine Ausführung mit mehreren Meßbereichen, die sich deswegen besonders für Prüffelder eignet, zeigt Fig. 35. Sie besitzt bei sekundär 100 Volt im Primärkreis die Meßbereiche: 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10000, 12000. Die Umschalter sind Kontakthebel auf der Marmorplatte des Gehäuses.

Direkt zeigende Phasenmesser.

Während man bekanntlich, wie auch im II. Abschnitt noch gezeigt wird, die Phasenverschiebung mit Wattmeter, Ampere-

meter und Voltmeter bestimmen kann, hat sich doch auch ein Bedürfnis nach Instrumenten herausgestellt, die den Phasenwinkel

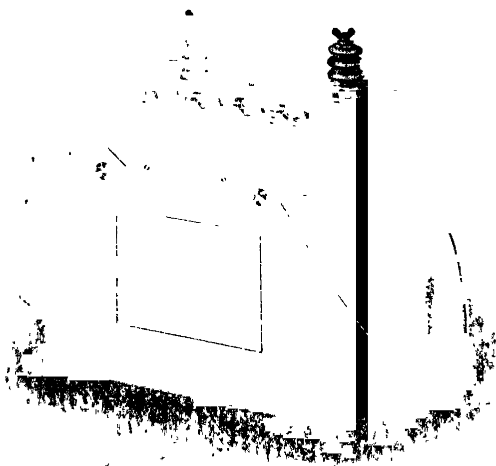


Fig. 35. Präzisions-Spannungtransformator für mehrere Meßbereiche von Siemens & Halske.

oder $\cos \varphi$ direkt anzeigen. Solche Instrumente wurden schon 1898 von Hartmann & Braun hergestellt, sind aber seitdem ganz wesentlich verbessert. Die moderne Konstruktion, Fig. 36, stellt im Prinzip ein doppeltes Wattmeter dar, mit einer beweglichen Hauptstromspule, welche direkt an den Sekundärklemmen eines kleinen, im Instrument eingebauten Stromwandlers T liegt. D ist eine Drosselspule, V ein Vorschaltwiderstand. Der Spannungskreis ist in zwei Zweige geteilt mit den Strömen i_1 i_2, welche in der Phase gegeneinander verschoben sind und deshalb zwei gegeneinander verschobene Felder im Eisenkörper des Instrumentes erzeugen, die entgegengesetzte Drehmomente auf das dreh-

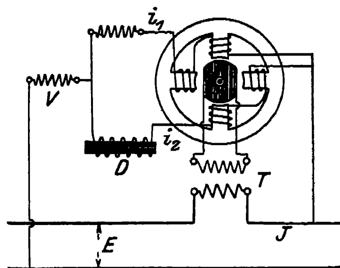


Fig. 36. Schaltung eines direkt zeigenden Phasenmessers von Hartmann & Braun.

bare Hauptfeld der beweglichen Spule ausüben. Durch empirische Eichung kann man die Teilung des Instrumentes bestimmen, die nach Fig. 37 sehr gleichförmig wird, wenn sie den Phasenwinkel in Graden anzeigt und nicht cos φ direkt anzeigt.

Das Instrument besitzt noch eine elektromagnetische Dämpfung, ähnlich wie die Hitzdraht-Instrumente derselben Firma, welche in Fig. 37 sichtbar ist. Man kann dort die Aluminium-Scheibe und den aus Lamellen zusammengesetzten Stahlmagneten erkennen, zwischen dessen Polen die mit der Achse der beweglichen Spule verbundene Aluminiumscheibe sich bewegt. Die bewegliche Spule, welche zum Zwecke einer gleichmäßigen Skalenteilung die aus Fig. 36 erkennbare Form hat, ist auf einer Stahlachse befestigt, die den Zeiger und die erwähnte Dämpferscheibe trägt. Die Stromzuführung zur beweglichen Spule erfolgt mittels zweier feiner Bronzebänder, die eine zu vernachlässigende kleine Torsionskraft besitzen.



Fig. 37. Phasenmesser von Hartmann & Braun.

Auch Siemens & Halske bauen direkt zeigende Phasenmesser auf dynamischem Prinzip unter Verwendung von Eisen im Instrument. Dieselben sind als Profilinstrumente mit gerader Skala ausgeführt, und gegen äußere Einflüsse sehr unempfindlich.

Hitzdraht-Instrumente.

Die Hitzdraht-Instrumente, welche sowohl für Gleich- als Wechselstrom ohne weiteres brauchbar sind, ebenso wie die dynamischen Instrumente, aber vor diesen den Vorzug haben, gänzlich unbeeinflußbar von äußeren Einflüssen zu sein, wurden bis vor kurzem allein von der Firma Hartmann & Braun ausgeführt,

die das Patent über die Benutzung des Hitzdrahtes zu Messungen besaß. Nach jetzt erfolgtem Ablauf der Schutzfrist fertigen auch andere Firmen Hitzdraht-Instrumente an. Das Prinzip der Instrumente folgt aus Fig. 38.. AB ist der Hitzdraht, der durch Spanndrähte CDE und eine gespannte Feder F straff gehalten wird. Ist der Draht kalt, so hat er die gestrichelte gestrecktere Lage und die Feder F ist stark gespannt, während der Zeiger auf Null steht. Bei Stromdurchgang wird der Draht warm und dehnt sich aus, so daß die Feder sich strecken kann. Dabei wird durch den um die Rolle der Achse geschlungenen Draht, der die Federspitze mit dem Punkt D verbindet, die Rolle und damit der Zeiger gedreht. Der Ausschlag des Zeigers ist nach folgender Überlegung proportional dem Quadrat des Stromes, die Teilung wird also im Anfang eng und später immer weiter.

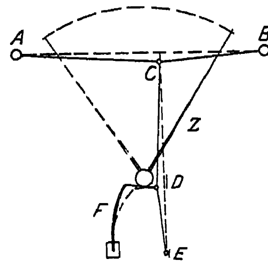


Fig. 38. Hitzdraht-Instrument.

Beim Stromdurchgang muß für ruhige Zeigerstellung, also Gleichgewichtslage bei irgend einem Ausschlag, die im Draht entwickelte Stromwärme gleich der vom Draht abgegebenen Wärmemenge sein. Die Stromwärme ist $C_1 \cdot i^2 \cdot r$, wobei C_1 eine Konstante und r der Widerstand des Hitzdrahtes ist. Die abgegebene Wärmemenge hängt ab von der Beschaffenheit der Drahtoberfläche und der mit ihm verbundenen Metall- und Konstruktionsteile, von der Bewegung der ihn umgebenden Luft und dem Temperaturunterschied zwischen Luft und Draht. Letzterer ist das einzige Veränderliche bei der abgegebenen Wärmemenge, die mit Q bezeichnet werden soll. Es gilt dann die Gleichung

$$C_1 \cdot i^2 \cdot r = Q.$$

$$Q = \frac{i^2}{C^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (4)$$

Die Längsausdehnung des Drahtes ist proportional der Wärmemenge, also

$$l = C_3 \cdot Q$$

und der Ausschlag a des Zeigers ist proportional der Ausdehnung des Hitzdrahtes, also

$$a = C_4 \cdot l = C_4 \cdot C_3 \cdot Q;$$

setzt man für Q den Wert aus Gleichung (4) ein, so wird

$$\alpha = C_4 \cdot C_3 \cdot \frac{i^2}{C_2} \quad \text{oder}$$

$$\alpha = C \cdot i^2 . \qquad (5)$$

Für ihre früheren Hitzdraht-Instrumente verwendeten Hartmann & Braun einen Platin-Silberdraht. Damit die Lufttemperatur des Raumes bei der Höchsttemperatur des Drahtes von 100° ohne Einfluß blieb, wurde eine Kompensationsplatte verwendet, auf der das System aufgebaut war. Diese Platte dehnte sich in gleichem Maße wie der Draht aus, so daß die Zeigerstellung durch Temperaturänderungen des Raumes nicht beeinflußt wurde. Bei plötzlichen Änderungen der Raumtemperatur, wenn z. B. das Instrument aus einem kälteren Raum in einen wärmeren Raum gebracht wird, dehnt sich der kleine Hitzdraht schneller aus als die Kompensationsplatte mit ihrer größeren Masse. Solange nun die Platte noch nicht die Temperatur des Raumes angenommen hatte, zeigte das Instrument falsch. Bei den neuen Konstruktionen von Hartmann & Braun ist der vorerwähnte vorübergehend mögliche Fehler vollkommen vermieden. Es zeigte sich, daß nicht die große Wärmeausdehnungsfähigkeit das Wichtigste ist, sondern möglichst hohe Widerstandsfähigkeit gegen Durchschmelzen und gegen Strukturänderungen. Es wird daher heute ein Platin-Iridium-Hitzdraht verwendet, obgleich dieser sich nur halb so viel ausdehnt als Platin-Silber. Aber das Material verträgt eine bedeutend höhere Strombelastung und Temperatur. Die Höchsttemperatur des Drahtes übertrifft die des alten Platinsilberdrahtes um ein Vielfaches, so daß die Schwankungen der Temperatur, die normalerweise in einem Raume auftreten können, verschwindend klein gegen die hohe Temperatur des Hitzdrahtes sind.

Die innere Einrichtung der neuen Hitzdraht-Instrumente zeigt Fig. 39. Der Platin-Iridium-Hitzdraht a ist mit den Enden an den Platten P_1 und P_2 befestigt. F ist die Zugfeder, welche den Draht durch die Spanndrähte c und b straff hält. Um eine Abweichung des Zeigers vom Nullpunkt einfach beseitigen zu können, besitzen die Instrumente eine von außen zugängliche Nullpunkteinstellung, in Fig. 39 am rechten Ende des Drahtes a angebracht. Außerdem ist eine elektromagnetische Dämpfung vorhanden, bestehend aus der Aluminiumscheibe A und dem Stahlmagnet m, der letztere mit seinen Polen umfaßt.

Die Hitzdraht-Instrumente von Siemens & Halske, Fig. 40, sind zur Vermeidung von Einflüssen der Umgebungstemperatur mit einem Kompensationsdraht versehen, und arbeiten nicht mit

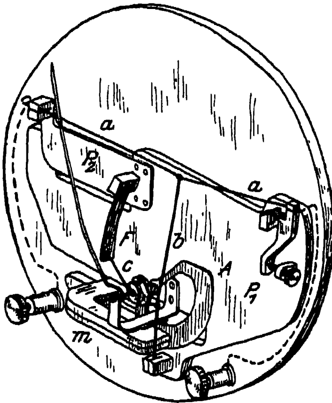


Fig. 39. Platin-Iridium-Hitzdraht-Instrument von Hartmann & Braun.

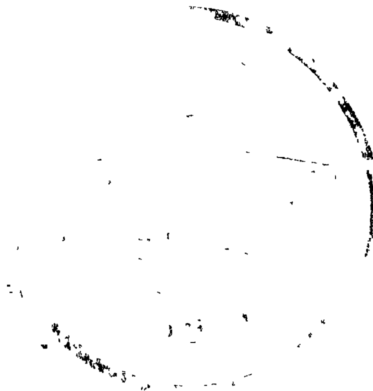


Fig. 40. Hitzdraht-Instrument von Siemens & Halske.

hoher Hitzdraht-Temperatur, wodurch sie gegen Überlastung sehr wenig empfindlich sind. Ferner besitzen sie eine Luftdämpfung.

In den beiden Figuren 41 und 42 sind die Hitzdraht-Instrumente der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft dargestellt, welche

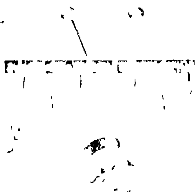


Fig. 41. Hitzdraht-Amperemeter der A. E. G.

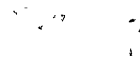


Fig. 42. Hitzdraht-Voltmeter der A. E. G.

Platinsilberdraht besitzen und elektromagnetische Dämpfung mit Stahlmagnet und Aluminiumscheibe.

Alle Hitzdraht-Instrumente besitzen einen verhältnismäßig feinen Hitzdraht und dürfen deshalb nur wenig Strom im Draht führen. Die Amperemeter erhalten deshalb Meßwiderstände und werden in der Schaltung, Fig. 8, benutzt, während die Voltmeter entsprechende Vorschaltwiderstände erhalten.

Ferraris-Instrumente.

Während die bisher besprochenen Instrumente, mit Ausnahme der elektromagnetischen Drehspul-Instrumente, die nur für Gleichstrom verwendbar sind, sowohl für Gleich- als für Wechselstrom benutzt werden können, sind die Ferraris-Instrumente nur für Wechselstrom zu gebrauchen. Die Grundform, auf denen sie beruhen, zeigt Fig. 43. Läßt man einen Wechselstrommagnet

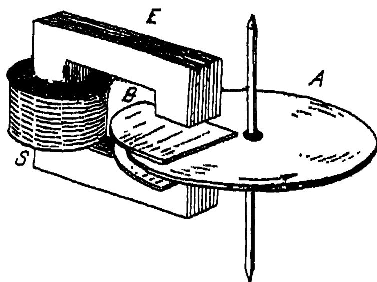


Fig. 43. Ferraris Prinzip.

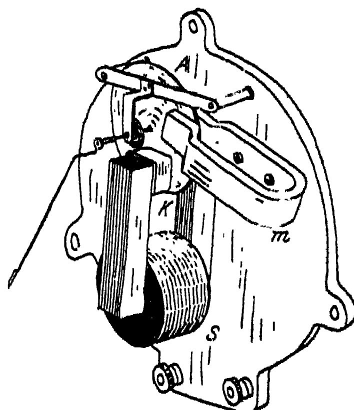


Fig. 44. Ferraris Instrument.

mit dem Eisenblechkörper E und der Spule S, dessen beide Pole zur Hälfte durch eine Kupferscheibe B abgedeckt sind, auf eine drehbare Metallscheibe A einwirken, so dreht sich die Scheibe, weil in ihr und in den Abdeckplatten B durch das Wechselfeld Ströme induziert werden, die aufeinander einwirken. Die Ausführung eines Instrumentes auf diesem Grundsatz zeigt Fig. 44. Der Wechselfeldmagnet besitzt hierbei einen Kurzschlußring K, anstatt der Abdeckscheiben. A ist die drehbare Scheibe, welche auf ihrer Achse den Zeiger trägt und durch eine Spiralfeder die Gegenkraft gegen die Verdrehung erhält. Die Dämpfung ist elektro-

magnetisch und wird durch die gleiche Scheibe A und den Stahlmagnet m bewirkt. Die Spule S wird für Volt- und Amperemeter gewickelt.

An Stelle einer Scheibe verwendet die Firma Hartmann & Braun eine Aluminiumtrommel und einen Eisenkörper mit vier Polen, von denen zwei mit einer Spannungswickelung und die beiden anderen mit einer Stromwickelung versehen werden können, wie Fig. 45 zeigt, so daß das Instrument außer als Volt- und Amperemeter noch als Wattmeter ausgeführt werden kann. Die Wirkungsweise des Instrumentes entspricht jetzt der eines Drehfeldmotors, dessen Läufer die Aluminiumtrommel ist.

Alle Ferraris-Instrumente sind abhängig von der Periodenzahl des Wechselstromes, wie ja auch die Umlaufszahl des Drehfeldmotors davon abhängt. Durch Versuche kann man natürlich Verhältnisse für das Instrument finden, unter denen eine möglichst geringe Abhängigkeit von der Periodenzahl vorhanden ist und um auch diese geringere Abhängigkeit noch zu beseitigen, benutzten Hartmann & Braun eine ihnen geschützte automatische Kompensationseinrichtung.

Da die Wickelungen der Instrumente und auch der metallene Drehkörper wegen der Größe der Widerstände aus Materialien hergestellt werden müssen, deren Temperaturkoeffizienten nicht verschwindend klein sind, wird, wenn nicht bei der Konstruktion Vorbeugungsmittel angewendet werden, sich daraus eine Abhängigkeit von der Temperatur ergeben. Nun ist es in den meisten Fällen möglich, die verschiedenen Stromzweige bei einem Ferraris-Instrument derart anzuordnen, daß sich die Widerstandsveränderungen in den einzelnen Zweigen und in dem Drehkörper ganz oder doch zum größten Teil aufheben, so daß die Abhängigkeit von der Temperatur praktisch zu vernachlässigen ist. Auch zur Beseitigung dieser Mängel wendet die Firma Hartmann & Braun A. G. eine ihr geschützte Schaltungsanordnung bei ihren Ferraris-Meßgeräten an.

Wenn alle die vorstehend erläuterten Gesichtspunkte bei der Konstruktion berücksichtigt worden sind, stellen die Ferraris-Meßgeräte für die Praxis äußerst brauchbare Meßinstrumente dar; denn da nur feste Windungen und deshalb keine Stromzuführungen zum beweglichen System notwendig sind, kann besonders das letztere sehr einfach hergestellt werden und der ganze Aufbau des Instrumentes robust gehalten werden. Das Drehmoment wird,

weil viel Eisen verwendet werden kann, im Verhältnis zum Systemgewicht ziemlich groß, so daß die Instrumente eine sehr große Richtkraft haben und trotz der möglichen starken Dämpfung wie kein anderes Instrument Schwankungen und veränderlichen Vorgängen folgen können. Der Eigenverbrauch an Leistung ist dabei sehr gering, weil die hauptsächlichsten Stromkreise der Instrumente eine sehr hohe Selbstinduktion bei geringem Ohmschen Widerstand haben und daher die Ströme eine ziemlich große wattlose Komponente besitzen.

Schaltung und Einrichtung der Ferraris-Instrumente von Hartmann & Braun sind durch die Figuren 45 und 46 wiedergegeben. Auf einem soliden Gußgestell *G* befindet sich in der Mitte ein aus Blechscheiben hergestellter Eisenzylinder *C*, über welchen die Aluminiumtrommel *T* gestülpt ist, deren Lagerung aus einer Stahlachse *A* mit vorzüglich gehärteten Spitzen in Saphirsteinen besteht. Die Achse trägt noch die Torsionsfeder *F* und den Zeiger *Z*, mit dessen Hilfe die Einstellung der Trommel auf einer Skala *S* abgelesen werden kann. Konzentrisch zu dem Eisenzylinder *C* und der Trommel *T* ist auf dem Gußgestell *G* noch der ebenfalls aus Eisenblechscheiben hergestellte, mit vier inneren Polansätzen versehene Ring *R* befestigt. Je zwei gegenüberliegende Polansätze tragen eine der zwei festen Wickelungen des Instrumentes.

Damit das bewegliche System bei Belastungsänderungen sich möglichst aperiodisch einstellt, ist eine stark wirkende magnetische Dämpfung angebracht, die aus zwei, mit ihren vier Polen die verlängerte Aluminiumtrommel *T* umfassenden Magneten *M* besteht, deren Kraftlinien die Trommel durchsetzen und sich in ihrem Inneren durch einen magnetisch von dem lamellierten Kern *C* isolierten kurzen Eisenzylinder schließen. Bei der Anordnung dieser Magnete ist Rücksicht darauf genommen, daß ihre Wirkung auf die von den Wechselfeldern in der Trommel erzeugten Wirbelströme Null ist, so daß ein Vibrieren des beweglichen Systems, hervorgerufen durch diese Magnete, nicht auftritt.

Die Ferraris-Instrumente werden als Ampere-, Volt- und Wattmeter, sowie als Phasenvergleicher hergestellt. Bei den Watt- und Voltmetern müssen noch Vorschaltwiderstände in Form von Drosselspulen untergebracht werden, die bei den Wattmetern gleichzeitig zur Herstellung der im Spannungskreis notwendigen Phasenverschiebung von 90° Verwendung finden. Bei den meisten

Instrumenten können diese Drosselspulen bei mittlerer Periodenzahl bis zur Spannung von 500 Volt noch in dem Gehäuse untergebracht werden. Für höhere Spannungen werden die Instrumente mit entsprechenden Spannungstransformatoren verbunden. Da die Ferraris-Instrumente viel in Hochspannung Verwendung

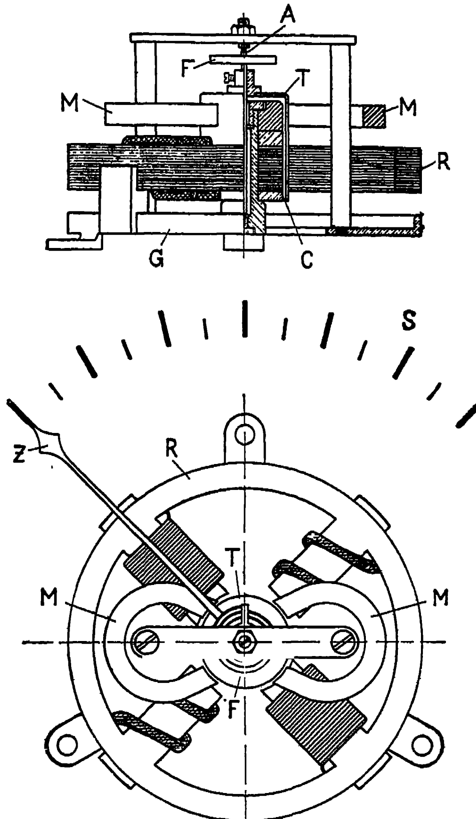


Fig. 45 und 46. Ferraris-Instrument von Hartmann & Braun.

finden, kommen für Watt- und Amperemeter meist nur Stromwickelungen für geringe Amperezahl in Frage, die dann an die Sekundärwickelungen von Stromtransformatoren anzulegen sind. Für Spannungen unter 500 Volt können jedoch Stromspulen bis zu 100 Ampere hergestellt werden.

Die Volt- und Amperemeter, sowie die Leistungszeiger für Einphasenstrom und für Mehrphasenstrom mit gleich belasteten Phasen besitzen nur ein Meßsystem, während die Leistungszeiger für Mehrphasenstrom mit ungleich belasteten Zweigen für Zweiphasen- und Dreiphasenstrom mit nur drei Leitungen zwei und für Dreiphasenstrom mit vier Leitungen drei miteinander gekuppelte Meßsysteme enthalten.

Die Teilungen der Wattmeter sind vollkommen gleichmäßig und der Nullstrich liegt normal am Anfang der Skala, kann aber auf Verlangen an jede andere Stelle gelegt werden, so daß dann sowohl positive als auch negative Leistungen am Instrument abgelesen werden können. Bei Ampere- und Voltmetern, bei denen das Drehmoment dem Quadrate des Stromes bzw. der Spannung proportional ist, wird zur Erzielung einer möglichst guten Skala eine einfache Einrichtung angewendet, die bei Amperemetern die Teilung bis herab zu etwa ein Sechstel des Maximalwertes gut ablesbar macht, bei Voltmetern dagegen an der Gebrauchsstelle die günstigste Skalenform ergibt.

Statische Instrumente.

Die statischen Instrumente beruhen auf der gegenseitigen Anziehung von Platten oder Körpern, die mit Punkten verschiedenen Potentiales verbunden sind. Ein einfaches statisches Instrument ist in Fig. 47 dargestellt. Die Metallplatten P_1 werden mit dem einen Pol verbunden, die an der Achse befestigten drehbaren Platten P_2 mit dem anderen Pol. Die Platten ziehen sich dann an und die Gegenwirkung wird durch eine Spiralfeder hervorgerufen. Die Platten P_2 sind möglichst leicht, aus dünnem Aluminiumblech. Gleichzeitig läßt sich elektromagnetische Dämpfung anwenden, indem eine der beweglichen Platten zwischen den Polen eines kleinen Stahlmagneten liegt. Die Instrumente müssen um so mehr Platten haben, je niedriger die Spannung ist und sind deshalb für Niederspannung schlecht ausführbar. Es sind auch

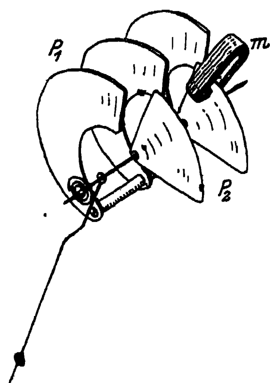


Fig. 47. Statisches Instrument.

die einzigen Voltmeter, die nicht auf einer Wirkung des Stromes beruhen, denn bei allen anderen als Voltmeter ausgeführten Instrumenten wird zur Spannungsmessung die Wirkung eines der Spannung proportionalen Stromes benutzt, hier bei den statischen Instrumenten wirkt die Spannung selbst unmittelbar. Es können daher auch die statischen Instrumente nur als Voltmeter hergestellt werden, aber für Gleich- und Wechselstrom. Da sie aber eigentlich nur Hochspannungsinstrumente sind, und Hochspannungsanlagen gewöhnlich mit Wechselstrom betrieben werden, benutzt man die statischen Instrumente vorwiegend für Wechselstrom.

Fig. 48. Statisches Instrument der A. E. G.

In Fig. 48 ist ein ähnlich wie in Fig. 47 ausgeführtes statisches Instrument der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft dargestellt. Da eine genügende statische Anziehung erst bei verhältnismäßig hohen Spannungen erzielt wird, beträgt die niedrigste Spannung, für welche die Instrumente gebaut werden, 1500 Volt. Vorzüge dieser Instrumente sind ihr geringer Eigenverbrauch, die Unabhängigkeit von Periodenzahl und Kurvenform der Spannung und gleichzeitige Brauchbarkeit für Gleich- und Wechselstrom.

Für Spannungen bis 7500 Volt erhalten die Voltmeter der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft unmittelbaren Anschluß an das Leitungsnetz; bei höheren Spannungen werden hintereinander geschaltete Plattenkondensatoren als Spannungsteiler benutzt, indem die Zuführungen zum Instrument nur von einem kleinen Teil der Kondensatoren-Batterie abgezweigt sind. Die Kondensatoren sind in einen gemeinsamen Kasten eingebaut und für die doppelte Betriebsspannung isoliert. Der Kasten wird mit einer festen Isoliermasse gefüllt.

Den Instrumenten bzw. Kondensatoren werden zweckmäßig Sicherungen von einigen Megohm Widerstand vorgeschaltet, die den Durchgang größerer Elektrizitätsmengen verhindern, wenn

bei etwa auftretenden Überspannungen ein Durchschlagen stattfindet. Die Instrumente werden nur in Stabilitgehäuse und mit rückseitigen Anschlußbolzen geliefert. Die listenmäßig höchste Spannung für die Instrumente nach Fig. 48 mit Kondensatoren beträgt 22000 Volt.

Siemens & Halske führen statische Voltmeter nach Fig. 49 aus. Bei diesen Instrumenten wird die eine Elektrode durch zwei feststehende Metallquadrantenpaare gebildet, zwischen denen als

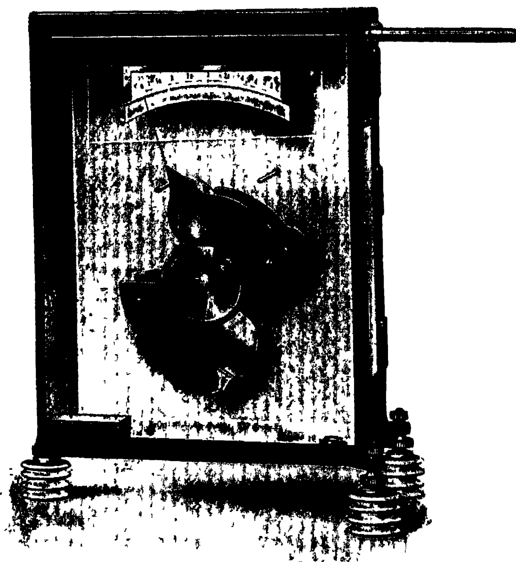


Fig. 49. Statisches Instrument von Siemens & Halske mit Luftisolation.

zweite Elektrode ein leicht beweglicher Flügel drehbar angeordnet ist. Direkt am beweglichen Flügel ist der Zeiger befestigt, der über der empirisch festgestellten Skala schwingt.

Das Instrument ist direkt für Spannungen bis 10000 Volt verwendbar. Für höhere Spannungen werden Vorschaltkondensatoren benutzt, durch die das Instrument bis zu 30000 Volt brauchbar wird.

Für sehr hohe Spannungen führen Siemens & Halske statische Voltmeter mit Ölisolation aus, die ohne Kondensatoren be-

nutzt werden und nach Fig. 50 mit Eisenfuß oder statt des Eisenfußes mit isolierendem Untersatz aus Porzellanrollen ausgeführt werden. Ein mit Öl gefülltes zylindrisches Glasgefäß steht in einer Metallwanne, welche als feststehende Elektrode dient. Die bewegliche Elektrode in Form einer runden flachen Schale hängt in dem Öl. Durch die zwischen beiden Elektroden auftretende Anziehungskraft wird das Schälchen heruntergezogen und hierbei die Gegenkraft einer Spiralfeder überwunden. Durch die besondere Art der Übertragung der Bewegung des Schälchens auf den Zeiger wird erreicht, daß die Skala annähernd proportional ist. Die Skala erstreckt sich über drei Viertel des Kreisumfanges.

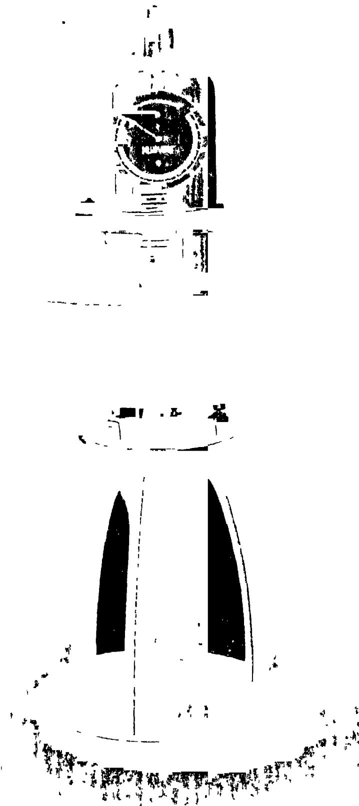


Fig. 50. Statisches Instrument für sehr hohe Spannungen mit Ölisolation von Siemens & Halske.

Durch die Verwendung von Öl als Dielektrikum wird es einerseits ermöglicht, einen verhältnismäßig kleinen Elektrodenabstand zu wählen, ohne daß die Gefahr des Überschlagens der Spannung besteht. Hierdurch wird eine wesentliche Vergrößerung der Anziehungskraft zwischen den Elektroden erreicht. Andererseits schützt das Öl auch gegen Störungen durch atmosphärische Einflüsse. Die das bewegliche System von unten umschließende Metallwanne schützt das Instrument gegen Beeinflussungen durch benachbarte leitende Flächen (wie Fußböden, Decken, Wände),

durch welche die Form des elektrischen Feldes im Instrument gestört wird. Von oben her ist das System durch eine mit der beweglichen Elektrode leitend verbundene Kugelkalotte aus Metall geschützt. Durch diese Schutzvorrichtungen wird gleichzeitig eine weitere Erhöhung der Systemkraft erreicht und hierdurch die Skala am Anfang wesentlich verbessert.

Je nach dem Verwendungszweck wird das Instrument mit isolierendem Untersatz oder mit Eisenfuß geliefert. Für gewöhnliche Spannungsmessung kommt die isolierte Aufstellung stets in Frage, wenn kein Pol geerdet werden darf. Der Eisenfuß ist anzuwenden, wenn die Erdung eines Poles zulässig ist, z. B. bei Isolationsmeßschaltungen.

Bei Messung sehr hoher Spannungen kann man zwei Voltmeter hintereinander schalten. Die Spannung wird sich hierbei annähernd gleichmäßig auf beide Instrumente verteilen, wenn man jede Erdung eines Außenleiters vermeidet. Man hat bei der Messung nur darauf zu achten, daß bei etwaiger ungleicher Spannungsverteilung nicht eine Überlastung eines Instrumentes auftritt. Um dies auszuschließen, verbindet man zweckmäßig die Mitte der Hochspannungswickelung des Transformators mit der Verbindungsleitung der beiden in Serie geschalteten Instrumente, wie Fig. 51 zeigt, und erdet die Verbindungsleitung. Man kann dann Instrumente mit Eisenfuß verwenden. Sollen z. B. Spannungen bis 240000 Volt gemessen werden, so schaltet man zwei Voltmeter für 120000 Volt auf Eisenfuß in Serie nach Fig. 51.

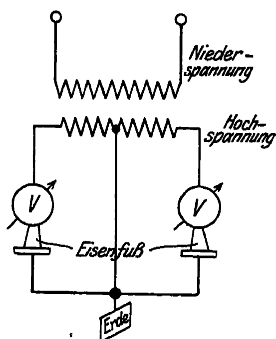


Fig. 51. Spannungsmessung bis 240000 Volt mit Instrumenten hintereinander.

Die Instrumente werden von **Siemens & Halske** in zwei Typen, die eine bis 50000 Volt und die andere bis 120000 Volt, gebaut.

Zweiter Abschnitt.

Messung der elektrischen Leistung (Watt).

Die Messung der Leistung erfolgt bei Gleichstrom mit Ampere- und Voltmeter, deren Angaben miteinander multipliziert werden. Bei Wechselstrom gibt aber das Produkt aus Strom und Spannung nur bei induktionsfreiem Stromkreis, also wenn keine Phasenverschiebung vorhanden ist, die wirkliche Leistung, sonst aber die zu hohen scheinbaren Watt, während die wirklichen Watt nur mit einem Wattmeter oder mit Amperemeter, Voltmeter und Phasenmesser (vgl. S. 38) bestimmt werden können. Neuerdings liefern Hartmann & Braun auch Wattmeter, mit denen man sowohl die wirkliche Leistung als auch mit genügender praktischer Genauigkeit die scheinbare Leistung bestimmen kann. Dies geschieht durch einen Vorschaltwiderstand mit zwei Anschlüssen. Beim einen Anschluß zeigt das Instrument als Wattmeter die wirkliche Leistung an, beim anderen Anschluß wirkt es als Arnometer, wie die Firma diese Instrumente nach dem Anreger des Gedankens nennt, der darauf beruht, daß man dem Strom in der Spannungsspule eine entsprechende Phasenverschiebung und Verstärkung erteilt, wodurch das Instrument die scheinbaren Watt anzeigt. Für die dem Zweck dieses Buches entsprechenden genauen Messungen empfiehlt sich die Messung mit Wattmeter, Ampere- und Voltmeter.

Über die Benutzung der Wattmeter mögen hier noch einige allgemeine Bemerkungen Platz finden. Um die Wirkung der festen Spule auf die bewegliche möglichst groß zu machen, müssen beide möglichst dicht zusammenliegen. Man kann also nicht mit Rücksicht auf größere Spannungsunterschiede auch größere Abstände anwenden und würde bei falscher Schaltung und höherer Spannung Überschläge wegen der kleinen Zwischenräume zwischen fester und beweglicher Spule befürchten müssen, die das Instrument zerstören können. Um diese Überschläge zu vermeiden, muß man so schalten, daß zwischen fester und beweglicher Spule möglichst wenig Spannungsunterschied besteht. Bei Anwendung von Vorschaltwiderständen und Meßtransformatoren ist darauf besonders zu achten.

In Fig. 52 ist eine falsche Schaltung dargestellt, denn der Vorschaltwiderstand R verbraucht meist einen sehr großen Teil

der Spannung e, da er immer viel mehr Widerstand besitzt als die Spannungsspule r, infolgedessen wird zwischen fester und beweglicher Spule ein Spannungsunterschied bestehen von $e - i \cdot r = i \cdot R$ Volt. Die Wattmeter von Siemens & Halske sind z. B. gewöhnlich so eingerichtet, daß ihr Widerstand $r = 1000\ \Omega$ beträgt (r setzt sich zusammen aus Widerstand der Spannungsspule + Vorschaltwiderstand im Instrument), während der Strom in der Spannungsspule $i = 0{,}03$ Ampere beträgt. Daraus ergibt sich in der Spannungsspule ein Spannungsabfall von $i \cdot r = 0{,}03 \cdot 1000 = 30$ Volt. Soll dann höhere Spannung z. B. $e = 3000$ Volt gemessen werden, so ist zwischen Spannungsspule und Stromspule ein Unterschied von 2970 Volt. Schaltet man dagegen in der richtigen Weise nach Fig. 25, II, so sind Spannungs- und Stromspule direkt verbunden und der Unterschied in der Spannung zwischen beiden beträgt höchstens $i \cdot r$ Volt. Bei einigen Messungen kann es auch vorkommen, daß die feste Spule in einen anderen Stromkreis als die Spannungsspule gelegt wird. Es muß dann, wie in Fig. 25, III angegeben ist, eine Ausgleichsleitung (gestrichelte Verbindung am Stromwandler T) hergestellt werden.

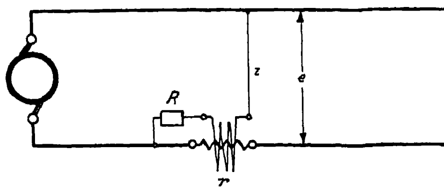


Fig. 52. Falsche Wattmeterschaltung, richtige Schaltung siehe Fig. 25, II.

Soll das Instrument in einen Stromkreis eingeschaltet werden, der unter Spannung steht, oder sollen unter Spannung Umschaltungen vorgenommen werden, so ist darauf zu achten, daß die direkte Verbindung zwischen derjenigen Leitung, in welcher die feste Spule liegt und der beweglichen Spule zuerst gemacht wird und daß erst hinterher die Verbindung der letzteren durch die Vorschaltwiderstände mit dem anderen Pole herbeigeführt wird, d. h. also man muß in Fig. 25, I oder 25, II zuerst A_1 mit e_1 verbinden und dann die Verbindungen nach e_2 anschließen. Ebenso muß man, um unter Spannung ohne Gefahr abzuschalten, zuerst die Verbindung nach e_2 lösen. Verfährt man falsch, so ist nach dem Abtrennen der Klemme e_1 bei noch bestehender Verbindung der Klemme e_2 mit dem anderen Pol zwischen Spannungsspule und Stromspule die volle Spannungsdifferenz wirksam.

Bei den eisenfreien Instrumenten ist darauf zu achten, daß der Strom in den Zuführungsleitungen zur Stromspule nicht stört. Man führt deshalb diese Zuführungsleitungen bis in 1,5 m Entfernung vom Instrument senkrecht von unten und einander parallel zu. Bei der Messung sehr kleiner Leistungen kann der Erdmagnetismus das Hauptfeld des Wattmeters beeinflussen. Man korrigiert diesen Fehler durch zwei Messungen, zwischen denen man den Strom in beiden Spulen umkehrt und nimmt das arithmetische Mittel aus beiden Ablesungen. Andere Apparate, die stärkere magnetische Felder erzeugen, z. B. Meßtransformatoren, dürfen nicht in unmittelbarer Nähe der Instrumente stehen. Ebenso soll man die Nähe von Starkstromleitungen meiden. Damit die Instrumente sich nicht gegenseitig beeinflussen, sollen sie etwa 40 cm Abstand voneinander haben. Auch statische Wirkungen können die Angaben der Wattmeter stark beeinflussen. Da die Spannungsspule ein ganz bestimmtes Potential hat, so kann zwischen ihr und benachbarten Körpern, die ein anderes Potential besitzen, eine Wechselwirkung auftreten, die ein Drehmoment erzeugt und Ausschlag hervorruft. Bei höherer Spannung ist daher das Instrument gut isoliert aufzustellen und Körper anderen Potentiales sind genügend entfernt zu halten. Die Isolierung erfolgt am besten durch Zwischenlegen einer Ebonit- oder Glasplatte zwischen Tischplatte und Instrument. Bei sehr hohen Spannungen empfiehlt es sich, die Instrumente auf Porzellanisolatoren (Isolierschemeln) aufzustellen und zum Schutz des Beobachters mit einer Glasplatte zu überdecken. Naturgemäß ist bei Hochspannung die Berührung der Instrumente lebensgefährlich.

Um die bei direkten Hochspannungsmessungen auftretenden Störungen der Instrumente durch elektrische Ladungserscheinungen zu vermeiden, rüsten Siemens & Halske alle dynamometrischen Instrumente der Laboratoriumstype, Wattmeter, Amperemeter, Voltmeter, mit einer Hochspannungseinrichtung aus, indem alle im Instrument liegenden Metallteile durch direkte Verbindung auf gleiches Potential gebracht werden und das ganze System durch zweckentsprechende Metallflächen eingeschlossen wird, so daß das bewegliche System nicht in Wechselwirkung mit äußeren Leitern treten kann. Auch das Putzen der Glasscheibe des Instrumentes vor der Messung kann durch statische Ladung der Scheibe auf die Spannungsspule und den Zeiger einwirken.

Man beseitigt solche durch Putzen entstandene Elektrisierungen durch leichtes Anhauchen der Scheibe.

Bei geringen Leistungen, bei denen der Vorschaltwiderstand vor der Spannungsspule klein ist, oder gar keiner vorhanden ist ($R = 0$), kann auch die Selbstinduktion dieser Spule stören. Die Angaben des Wattmeters sind alsdann nach folgender Überlegung zu korrigieren:

Die Leistung, welche das Wattmeter mißt, ist

$$A = J \cdot E.$$

Bei Wechselstrom wird aber im allgemeinen J eine Phasenverschiebung φ gegen E haben, dann gilt:

$$A = J \cdot \cos\varphi \cdot E \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (7)$$

Hierbei ist aber vorausgesetzt, daß der Strom i, welcher der Spannung e proportional ist und durch die Spannungsspule fließt, keine Phasenverschiebung gegen E hat. Es sei der scheinbare Widerstand von $r + R$ (Spannungsspule + Vorschaltwiderstand)

$$r' = \sqrt{(R + r)^2 + L^2 \omega^2},$$

dabei ist L der Selbstinduktionskoeffizient der Spannungsspule, $\omega = 2\pi\nu$ und ν die Wechselzahl des Stromes in der Sekunde. Dann hat auch i eine Phasenverschiebung ψ gegen E, welche aus Fig. 53 folgt zu

$$\cos\psi = \frac{R + r}{\sqrt{(R + r)^2 + L^2 \omega^2}}.$$

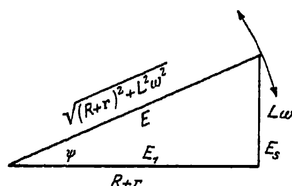


Fig. 53. Spannungs- und Widerstandsdreieck für Wattmeter.

Aus Fig. 53 ergibt sich gleichzeitig die Bestimmung von L durch zwei Messungen. Man bestimmt mit Gleichstrom (vgl. Abschnitt III) die Widerstände $R + r$ und bestimmt mit einem Wechselstrom Amperemeter und Voltmeter bei einem Wechselstrom i_1 den Spannungsverlust e, so ergibt sich:

$$\frac{e}{i_1} = \sqrt{(R + r)^2 + L^2 \omega^2} \quad \text{daraus folgt}$$

$$L = \sqrt{\frac{\left(\frac{e}{i_1}\right)^2 - (R + r)^2}{\omega^2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{e}{i_1}\right)^2 - (R + r)^2}{(2\pi\nu)^2}}.$$

Der Strom, welcher bei Wechselstrom ohne Selbstinduktion der Spannungsspule durch letztere hindurchgehen würde, ist:

$$i = \frac{E}{R + r}.$$

Der Strom, welcher in Wirklichkeit durch die Spannungsspule fließt, ist:

$$i_1 = \frac{E}{\sqrt{(R + r)^2 + L^2 \omega^2}}.$$

Wenn A_1 die Angaben des Wattmeters sind, die abgelesen werden, so ergibt sich daraus die wirkliche Leistung A zu:

$$A = A_1 \frac{i}{i_1} = A_1 \frac{\sqrt{(R + r)^2 + L^2 \cdot \omega^2}}{R + r} \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

In den meisten Fällen ist aber das Produkt $L^2 \omega^2$ in dem Ausdruck $(R + r)^2 + L^2 \omega^2$ sehr klein gegen $(R + r)^2$, weil die Vorschaltwiderstände R stets induktionsfrei gewickelt sind und gegen die Spannungsspule einen sehr hohen Widerstand haben. Man kann dann $L^2 \omega^2$ vernachlässigen und die Korrektion wird

$$\frac{\sqrt{(R + r)^2}}{R + r} = 1.$$

Bei den dynamischen Wattmetern von Hartmann & Braun ist $L = 0{,}0045$ Henry und $i = 0{,}03$ Ampere in der Spannungsspule bei normaler Höchstspannung.

Leistungsmessung in Dreiphasensystemen.

In Dreiphasensystemen geschieht die Messung der Leistung mit drei Wattmetern, deren Stromspulen nach Fig. 54, I von allen Strömen J_1, J_2, J_3 durchflossen werden, während die Spannungsspulen bei Sternschaltung sämtlich zwischen Knotenpunkt P und einer Leitung liegen. Die Leistung ist dann:

$$A = J_1 \cdot e_1 \cdot \cos \varphi_1 + J_2 \cdot e_2 \cdot \cos \varphi_2 + J_3 \cdot e_3 \cdot \cos \varphi_3;$$

dabei sind J_1, J_2, J_3 die Effektivwerte der Ströme, e_1, e_2, e_3 sind die Effektivwerte der einzelnen Phasenspannungen, φ_1, φ_2, φ_3 sind die entsprechenden Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung. Zuweilen ist der Knotenpunkt nicht zugänglich, dann stellt man ihn künstlich her, indem man nur die Enden der Spannungsspulen der drei Wattmeter, die sonst zum Knotenpunkt geführt werden müßten, miteinander verbindet.

Bei gleicher Belastung der drei Phasen kann man die Messung

mit nur einem Wattmeter ausführen, welches mit der Spannungsspule am Knotenpunkt liegt. Ist dieser nicht erreichbar, so kann man ihn hier ebenfalls künstlich herstellen, nach Fig. 54, II durch

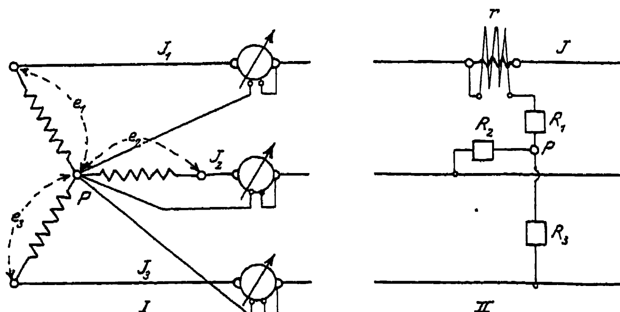


Fig. 54. Leistungsmessung bei Dreiphasenstrom und Sternschaltung.

Verwendung der Vorschaltwiderstände R_2 und R_3, die mit $R_1 + r$ zu dem künstlichen Knotenpunkt P geführt sind. Die Widerstände müssen der Gleichung genügen:

$$R_2 = R_3 = R_1 + r.$$

Für Dreiecksschaltung gilt ebenfalls die Gleichung:

$$A = i_1 \cdot e_1 \cdot \cos \varphi_1 + i_2 \cdot e_2 \cdot \cos \varphi_2 + i_3 \cdot e_3 \cdot \cos \varphi_3,$$

wobei die Ströme i_1, i_2, i_3 nach Fig. 62 in den einzelnen Phasen zu nehmen sind, daher wird die Schaltung der drei Wattmeter zuweilen, besonders bei Maschinen, schlecht ausführbar. Man wendet dann einfach eine der nachstehenden Methoden an.

Leistungsmessung bei Dreiphasensystemen mit zwei Wattmetern.

Bequemer als die Messungen mit drei Wattmetern sind die Leistungsmessungen mit zwei Wattmetern, welche sich sowohl bei Stern- als bei Dreieckschaltung und bei gleicher und ungleicher Belastung der drei Phasen anwenden lassen.

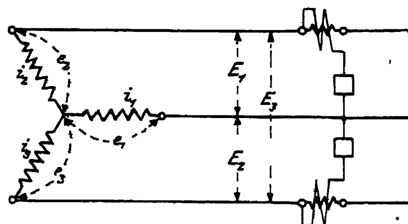


Fig. 55. Zwei-Wattmetermessung bei Sternschaltung.

Für Sternschaltung gilt nach Fig. 55:

$$i_1 + i_2 + i_3 = O.$$

Die Gesamtleistung ist:

$$A = i_1 \cdot e_1 + i_2 \cdot e_2 + i_3 \cdot e_3 \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad \text{(I)}$$

Da die Gleichung gilt: $O \cdot e_1 = O$, in welcher man für $O = i_1 + i_2 + i_3$ setzt, so wird

$$(i_1 + i_2 + i_3) \cdot e_1 = O; \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad \text{(II)}$$

Gleichung (I) — Gleichung (II) gibt

$$i_2 (e_2 - e_1) + i_3 \cdot (e_3 - e_1) = A \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad \text{(III)}$$

Aus Fig. 56 ergeben sich die Phasenwinkel zwischen Strömen und Spannungen. E_1 stellt die Differenz $(e_1 - e_2)$ dar. Zur Be-

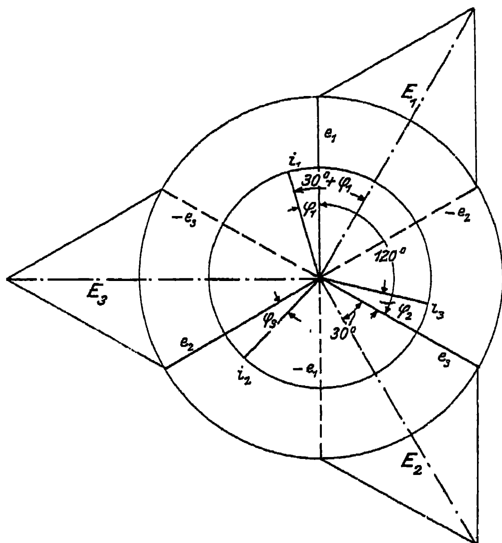


Fig. 56. Phasenverschiebung bei Drehstrom.

stimmung wird e_2 nach rückwärts (gestrichelt) verlängert und die Resultierende aus e_1 und $-e_2$ gekennzeichnet. Ebenso läßt sich die Differenz $E_2 = e_3 - e_1$ finden. Unter Berücksichtigung der aus Fig. 56 folgenden Gleichungen:

$$E_1 = e_1 - e_2,$$
$$E_2 = e_3 - e_1,$$

folgt aus Gleichung (III)

$$i_3 \cdot E_2 - i_2 \cdot E_1 = A \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (9)$$

Die Schaltung der nach dieser Gleichung (9) arbeitenden Wattmeter geschieht nach Fig. 55. Die Gesamtleistung wird also:

$$A = i_3 \cdot E_2 \cdot \cos \varphi_4 - i_2 \cdot E_1 \cdot \cos \varphi_5,$$

dabei sind dann φ_4 und φ_5 die Phasenwinkel zwischen E_2 und i_3 und E_1 und i_2. Gleichung (9) gilt nur für die Augenblickswerte. Für die Mittelwerte gilt

$$A = \frac{1}{T}\int_0^T i_3 \cdot E_2 \cdot dt - \frac{1}{T}\int_0^T i_2 \cdot E_1 \cdot dt \quad . \; . \quad (10)$$

Das Integral $\int_0^T i \cdot E \cdot dt$ allgemein zeigt jedes Wattmeter an. Es ist dies die Summe der Produkte aus den Augenblickswerten von E und i für die Zeit T einer Periode, nach Fig. 57 die Flächen A_1, A_2, A_3, A_4. Ist keine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung vorhanden, dann sind die Kurven für E und i in Fig. 57 nicht gegeneinander verschoben und die Flächen A_3 und A_4, welche negativ sind, d. h. verlorene Werte darstellen, werden dann zu Null, weil dann beide Faktoren E und i immer gleichzeitig die Richtung wechseln, so daß beide gleichzeitig (+) sind und ihr Produkt (+) ergibt, oder daß beide gleichzeitig nach $\frac{T}{2}$ Sekunden (—) werden und ihr Produkt, weil beide Faktoren negativ sind, abermals (+) ergibt. Bei Phasenverschiebung φ ist aber i zuerst noch negativ, während E schon positiv ist, das Produkt A_3 gibt also (—); nach $\frac{T}{2}$ Sekunden wird E negativ, i ist aber noch kurze Zeit (+), folglich erhält man so lange, bis i auch negativ wird, das Produkt A_4 negativ. Je größer φ ist, um so größer werden die negativen Flächen A_3 und A_4. Für $\varphi = 90^0 = \frac{\pi}{2}$ werden die Flächen $A_1 = A_2 = A_3 = A_4$ also die Summe Null.

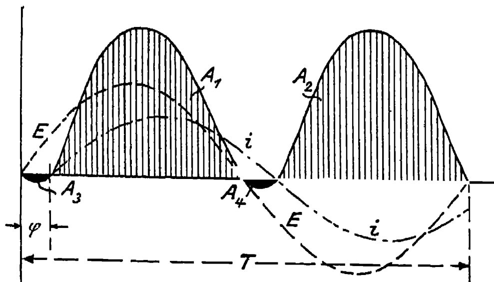


Fig. 57. Leistungsflächen bei Phasenverschiebung.

Man bezeichnet

$$\int_0^T i \cdot E \cdot dt = i_{eff} \cdot E_{eff},$$

dann sind i_{eff} und E_{eff} die effektiven Werte, welche durch Amperemeter und Voltmeter gemessen werden. Wenn Phasenverschiebung φ vorhanden ist, wird

$$\frac{1}{T}\int_0^T i \cdot E \cdot dt = i_{eff} \cdot E_{eff} \cdot \cos\varphi = A_1 + A_2 - (A_3 + A_4) = A).$$

Der Wert T ist die Zeitdauer für eine Welle oder Periode und da Leistung $= \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}$ ist, so ist mit $\frac{1}{T}$ zu multiplizieren. Die gesamte Leistung läßt sich auch mit einem Wattmeter messen, wenn man dasselbe nach Fig. 58 mit einem Umschalter U_1 verbindet, so daß man sofort nacheinander zwei Messungen ausführen kann. Zweckmäßig setzt man vor die Spannungsspule ebenfalls einen Umschalter U_2, weil bei einer gewissen Phasenverschiebung der Aus-

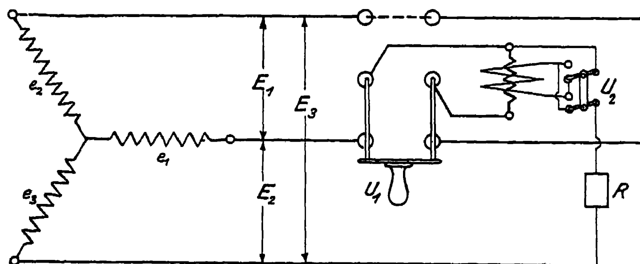


Fig. 58. Zwei-Wattmetermessung mit einem Wattmeter.

schlag des Wattmeters bei der zweiten Messung negativ werden kann. Um ihn ablesen zu können, muß man dann mit U_2 den Strom in der Spannungsspule umschalten.

Erfolgt der Ausschlag des Wattmeters beim Umschalten von U_1 nach der richtigen Seite, dann ist das Zeichen (—) in Gleichung (10) in (+) zu verwandeln und es gilt:

$$\text{Gesamtwatt} = \text{Watt}_1 + \text{Watt}_2.$$

Muß man aber, damit der Ausschlag nach dem Umschalten von U_1 in der richtigen Weise erfolgt, U_2 auch umschalten, dann ist die kleinere Ablesung von der größeren abzuziehen und es gilt:

$$\text{Gesamtwatt} = \text{Watt}_1 - \text{Watt}_2;$$

wobei Watt_2 der kleinere Wert ist.

Die Erklärung hierfür ist folgende: Aus Fig. 56 ist ersichtlich, daß der Winkel zwischen E_1 und i_2 zwischen 120° und 120° + 90° liegen kann; der cos dieses Winkels ist also in allen Fällen negativ, so daß in Gleichung (10) gesetzt werden muß:

$$-\left(-\frac{1}{T}\int_0^T i_2 \cdot E_1 \cdot d\,t\right) = +\frac{1}{T}\int_0^T i_2 \cdot E_1 \cdot d\,t.$$

Der Winkel zwischen E_2 und i_3 kann zwischen 30° und 120° liegen, wie die gleiche Figur zeigt; ist er größer als 90°, dann wird sein cos negativ; es zeigt der zweite Wattmeterausschlag nach dem Umschalten nach der falschen Seite und U_2 muß auch umgeschaltet werden. Es gilt also:

$$-\frac{1}{T}\int_0^T i_3 \cdot E_2 \cdot d\,t.$$

Dieser letzte Wert ist immer der kleinere von beiden.

Damit die Umschaltung in Fig. 58 überhaupt möglich wird, muß der Umschalter U_1 so ausgeführt sein, daß er ohne Unterbrechung des Stromes umgelegt werden kann. Einen besonderen Umschalter für solche Messungen liefern Siemens & Halske, dessen Prinzip Fig. 59 zeigt.

Eine Ellipse E ist fest verbunden mit einer Nase N, auf welche ein am Hebelgriff befestigter Stift S drückt, wenn die Kontaktmesser M des Umschalters eingeschaltet sind. Die Ellipse biegt die Kontaktfedern F_1 auseinander, so daß der direkte Weg von Kontakt zu Kontakt unterbrochen ist und der Strom durch die Stromspule des Wattmeters hindurch muß. Beim Heben des Griffes entfernt sich der Stift S von der Nase N und die Federn F_1 legen sich auf F_2, wobei sie die Ellipse drehen, so daß noch, ehe die Kontaktmesser M aus den Kontakten heraus sind, die Stromspule des Wattmeters kurzgeschlossen ist und deshalb ab- oder umgeschaltet werden kann. Die Ausführung des Schalters zeigt Fig. 60. Er wird für Ströme bis 1000 Ampere und für Spannungen bis 10000 Volt ausgeführt. Man kann aus diesem Grunde bei Benutzung

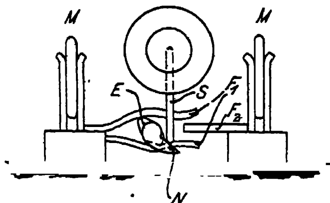


Fig. 59. Umschalter U_1 zu Schaltung 58 von Siemens & Halske.

des Umschalters sogar für Messungen an verschiedenen Maschinen nur ein Wattmeter verwenden, indem man in den Stromkreis einer jeden Maschine einen Umschalter legt, der für gewöhnlich in der Mittellage steht, wo beide Leitungen verbunden sind. Erst wenn man eine Messung machen will, schließt man an die Mittelkontakte die Stromspule des Wattmeters an, dessen Spannungsspule man ja unter Beachtung der früher gegebenen Regeln während des Betriebes anschließen darf, wenn die Anlage nicht Hochspannung führt.

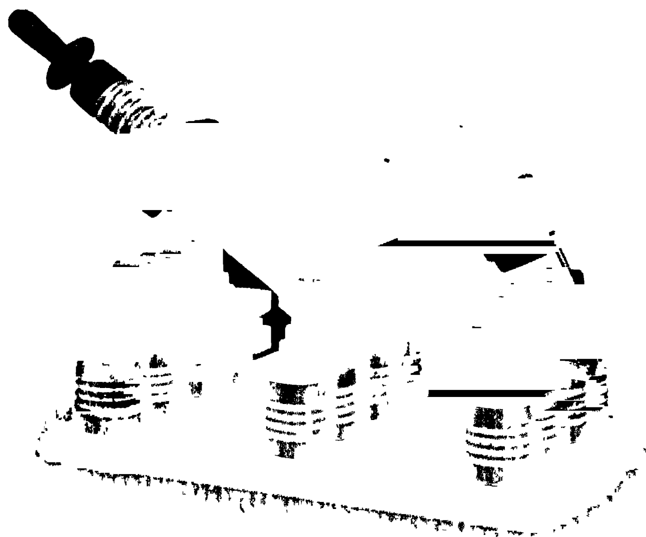


Fig. 60. Wattmeter-Umschalter von Siemens & Halske.

Weil die beiden Messungen in Fig. 58 nacheinander ausgeführt werden, ist natürlich wie auch in Fig. 61 Voraussetzung, daß der Betrieb kein schwankender ist.

Nach Dr. Breitfeld läßt sich bei gleicher Belastung aller drei Phasen (Drehfeldmotoren) die Leistung durch Umschalten der Spannungsspule mit einem Wattmeter bestimmen (E. T. Z. 1899). In Fig. 61 ist die Schaltung dazu gegeben. U_1 ist der Umschalter, vermittels dessen die Spannung E_1 oder E_2 auf die Spannungsspule des Wattmeters geschaltet werden kann. U_2 dient nur zum

Herbeiführen des Ausschlags nach der richtigen Seite der Skala, denn auch hier kann bei bestimmten Phasenverschiebungen der Ausschlag des Zeigers nach der falschen Seite erfolgen.

Es gilt wieder für die Augenblickswerte:

$$A = i_1 \cdot e_1 + i_2 \cdot e_2 + i_3 \cdot e_3.$$

Voraussetzung ist $\quad i_1 = i_2 = i_3$

und $\quad e_1 = e_2 = e_3,$

folglich dann $\quad A = 3 \cdot i_1 \cdot e_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad$ (IV)

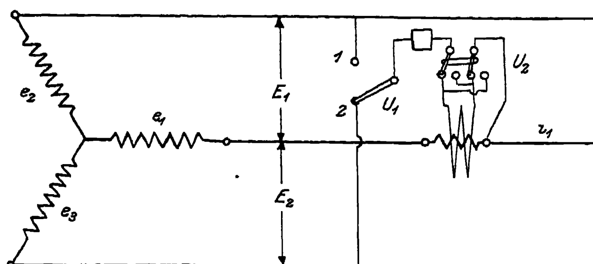


Fig. 61. Wattmessung bei gleicher Phasenbelastung nach Dr. Breitfeld.

Wenn die Leistung mit einem Wattmeter nach Fig. 61 bestimmt wird, dann müßte sein:

$$A = i_1 \cdot E_1 + i_1 \cdot E_2.$$

E_2 ist aber gegen i_1 negativ; außerdem ist stets, auch wenn e_1 und i_1 zusammenfallen, zwischen E_1 und i_1 eine Phasenverschiebung von 30° und zwischen E_2 und i_1 eine solche von $120 + 30 = 150°$ (s. Fig. 56), folglich gilt:

$$A = i_1 (E_1 \cdot \cos 30° - E_2 \cdot \cos 150°) \quad \ldots\ldots \quad \text{(V)}$$

Durch Gleichsetzen von (IV) und (V) wird

$$A = 3 \cdot i_1 \cdot e_1 = i_1 (E_1 \cdot \cos 30° - E_2 \cdot \cos 150°).$$

Nun ist $\quad E_1 = E_2 = \sqrt{3} \cdot e,$

also $\quad A = 3 \cdot i_1 \cdot e_1 = i_1 \cdot e_1 \cdot \sqrt{3}\,[\cos 30° - (-\sin 60°)]$

oder $\quad 3 = \sqrt{3}\,[{}^1/_2 \sqrt{3} - (-{}^1/_2 \sqrt{3})] = 3.$

Daraus folgt, daß unter der Voraussetzung gleicher Belastung der drei Phasen die Messung nach Fig. 61 ausgeführt werden kann. Aus Gleichung (V) ergibt sich für die Messung unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung (nach Fig. 56) die Gleichung:

$$\mathbf{A = i_1 \cdot E_1 \cdot \cos (30° + \varphi_1) - i_1 \cdot E_2 \cdot \cos (150° + \varphi_1)} \quad . \quad \mathbf{(11)}$$

φ_1 kann zwischen 0^0 und 90^0 liegen. Für $\varphi_1 < 60^0$ ergibt sich aus Gleichung (11):

$$A = i_1 \cdot E_1 \cdot \cos(30^0 + \varphi_1) - [- i_1 \cdot E_2 \cdot \cos(30^0 + \varphi_1)],$$
$$A = i_1 \cdot E_1 \cdot \cos(30^0 + \varphi_1) + i_1 \cdot E_2 \cdot \cos(30^0 + \varphi_1).$$

Für $60^0 < \varphi_1 < 90^0$ gilt:

$$A = - i_1 \cdot E_1 \cdot \cos(30^0 + \varphi_1) - [- i_1 \cdot E_2 \cdot \cos(30^0 + \varphi_1)],$$
$$A = i_1 \cdot E_2 \cdot \cos(30^0 + \varphi_1) - i_1 \cdot E_1 \cdot \cos(30^0 + \varphi_1).$$

Hier gilt also bezüglich der Benutzung des Umschalters U_2 genau dasselbe, was bei dem Siemensschen Umschalter bei Fig. 58 erwähnt ist; die beiden Ablesungen sind zu addieren, wenn U_2 nicht umgeschaltet wird; die kleinere ist von der größeren abzuziehen, wenn U_2 umgeschaltet werden muß.

Für **Dreiecksschaltung** läßt sich auch eine Gleichung aufstellen, aus welcher folgt, daß die Leistungsmessung bei gleicher oder ungleicher Belastung der drei Phasen mit zwei Wattmetern möglich ist, die nach Fig. 62 geschaltet werden müssen. Nach dieser Figur gelten die Gleichungen:

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0,$$
$$i_1 \cdot e_1 + i_2 \cdot e_2 + i_3 \cdot e_3 = A \quad \text{(VI)}$$
$$0 \cdot i_1 = 0,$$
$$i_1 \cdot (e_1 + e_2 + e_3) = 0 \quad \text{(VII)}$$

Gleichung (VI) — (VII) ergibt:

$$A = e_2 \cdot (i_2 - i_1) + e_3 \cdot (i_3 - i_1)$$

oder

$$A = e_3 \cdot J_2 - e_2 \cdot J_1.$$

Auch hier wird infolge der Phasenverschiebungen der negative Ausdruck meist positiv, genau wie bei Sternschaltung.

Ebenso läßt sich die Messung der beiden Effekte mit einem Wattmeter und dem Siemensschen Umschalter (Fig. 59 und 60) ausführen, wobei der Umschalter auch nach Fig. 58 anzuschließen ist, damit nacheinander die Messungen ausgeführt werden können, die nach Fig. 62 mit zwei Wattmetern geschehen.

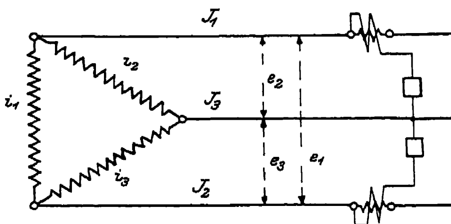


Fig. 62. Zwei-Wattmessung bei Dreiecksschaltung.

Erfolgt der Wattmeterausschlag bei beiden Messungen nach derselben Seite, dann sind die beiden Ablesungen zu addieren, um die Gesamtleistung zu erhalten; erfolgt der Ausschlag einmal nach

der entgegengesetzten Seite, so daß der vor der Spannungsspule des Wattmeters liegende Umschalter umgeschaltet werden muß, dann ist auch hier bei Berechnung der Gesamtleistung der kleinere Wert vom größeren abzuziehen.

Sämtliche beschriebenen Zwei-Wattmetermessungen sind unabhängig von der Kurvenform der Wechselströme; sie sind stets richtig und anwendbar, wenn die Summe aller Phasenströme bei Sternschaltung oder die Summe aller Phasenspannungen bei Dreiecksschaltung Null ist. Weitere Voraussetzungen als $\Sigma(i) = 0$ oder $\Sigma(e) = 0$ sind nicht nötig. Es empfiehlt sich, die beiden Messungen mit einem einzigen Wattmeter nacheinander auszuführen, weil man dann durch die Richtung des Zeigerausschlages leichter erkennt, wann die beiden Ablesungen zusammenzuzählen oder abzuziehen sind.

Bestimmung des Leistungsfaktors.

Bei Sinusströmen wird der Leistungsfaktor gewöhnlich mit $\cos\varphi$ bezeichnet, wenn φ der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung ist. Der Leistungsfaktor läßt sich, wie schon im Anfang dieses Abschnittes bemerkt wurde, unter allen Umständen mit Wattmeter, Amperemeter und Voltmeter bestimmen.

Mit dem Amperemeter wird der effektive Strom J gemessen, mit dem Voltmeter die effektive Spannung E, das Wattmeter zeigt die wirklichen Watt $A = J \cdot E \cdot \cos\varphi$ an. Es ist dann der Leistungsfaktor gegeben durch:

$$\cos\varphi = \frac{A}{J \cdot E} \quad \ldots \ldots \quad (12)$$

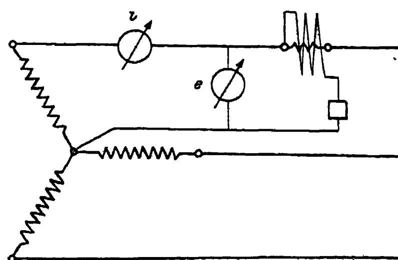


Fig. 63. Messung von cos φ bei gleicher Phasenbelastung.

Der Leistungsfaktor ist also das Verhältnis der wirklichen zu den scheinbaren Watt. Auch bei solchen Maschinen, die keine sinusförmigen Stromkurven liefern, läßt er sich immer durch die oben genannten drei Instrumente bestimmen.

Bei **Dreiphasenstrom** muß man zur genauen Bestimmung des Leistungsfaktors je drei Ampere-, Volt- und Watt-

meter benutzen, mit denen man nur die Phasenspannungen oder Ströme messen darf. Bei gleicher Belastung der drei Phasen (Motoren) braucht man die Messungen nur in einer Phase auszuführen.

Für Sternschaltung zeigt Fig. 63 die Schaltung. Wenn der Knotenpunkt nicht zugänglich ist, wendet man für das Wattmeter Schaltung 54 II an.

Fig. 64. Messung von $\cos\varphi$ bei gleicher Phasenbelastung.

Bei Dreiecksschaltung ist nach Fig. 64 zu verfahren. In beiden Fällen, in Fig. 63 und in Fig. 64 gilt:

$$\cos\varphi = \frac{A}{i \cdot e}.$$

Bestimmung des Leistungsfaktors durch Zwei-Wattmetermessungen.

Der Leistungsfaktor läßt sich mit Hilfe der schon beschriebenen Zwei-Wattmetermessungen sehr bequem bestimmen. Voraussetzung sind aber sinusförmige Ströme und gleiche Belastung der drei Phasen.

Nach Fig. 56 ist bei **Sternschaltung** (Fig. 55 und 58) [siehe auch Formel (9)]:

$$\text{Watt}_{\text{I}} = A_{\text{I}} = -\, i_2 \cdot E_1 \cdot \cos(210^0 - \varphi_2) = i_2 \cdot E_1 \cdot \cos(30^0 - \varphi_2)$$
$$\text{Watt}_{\text{II}} = A_{\text{II}} = i_3 \cdot E_2 \cdot \cos(30^0 + \varphi_2).$$
$$A_{\text{I}} = i_2 \cdot E_1 (\cos 30^0 \cdot \cos\varphi + \sin 30^0 \cdot \sin\varphi),$$
$$A_{\text{II}} = i_3 \cdot E_2 (\cos 30^0 \cdot \cos\varphi - \sin 30^0 \cdot \sin\varphi).$$

Hieraus folgt:

$$A_{\text{I}} - A_{\text{II}} = 2 \cdot i_2 \cdot E_1 \cdot \sin 30^0 \cdot \sin\varphi = i_2 \cdot E_1 \cdot \sin\varphi,$$

weil $2 \cdot \sin 30 = 1$ und nach Voraussetzung $i_3 = i_2$ und $E_1 = E_2$ ist.

Weiter ist:

$$A_{\text{I}} + A_{\text{II}} = 2 \cdot i_2 \cdot E_1 \cdot \cos 30^0 \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot i_2 \cdot E_1 \cos \cdot \varphi,$$

$$\frac{A_{\text{I}} - A_{\text{II}}}{A_{\text{I}} + A_{\text{II}}} = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \operatorname{tg}\varphi.$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3} \cdot \frac{A_{\text{I}} - A_{\text{II}}}{A_{\text{I}} + A_{\text{II}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \textbf{(13)}$$

Genau dieselbe Ableitung besteht auch für die Schaltung Fig. 61, weil auch für diese die Gleichung besteht:

und $A = i_1 [E_1 \cdot \cos(30^0 - \varphi_1) + E_2 \cdot \cos(30^0 + \varphi_1)]$

$E_1 = E_2$ ist.

Für **Dreiecksschaltung** nach Fig. 62 läßt sich Gleichung (13) auch ableiten, sie folgt hier durch dieselben Umformungen wie bei Sternschaltung, nur lauten die Gleichungen nach S. 67:

$A = A_I + A_{II} = - e_2 \cdot J_1 \cdot \cos(30^0 - \varphi_2) + e_3 \cdot J_2 \cdot \cos(30^0 + \varphi_2)$, woraus dann auf dieselbe Weise wie bei Sternschaltung gefolgert werden kann:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \cdot \frac{A_I - A_{II}}{A_I + A_{II}}.$$

Mußte bei der Bestimmung von A_{II} der Umschalter U_2 (Fig. 58, 61) umgeschaltet werden, dann kehren sich die Vorzeichen von A_{II} um.

In der folgenden Tabelle II sind die für die besprochenen Fälle anzuwendenden Methoden noch einmal zusammengestellt.

Tabelle II.

Anwendbare Methode	Sternschaltung			
	gleiche Phasenbelastung		ungleiche Phasenbelastung	
	Leistung	Leistungsfaktor ($\cos\varphi$)	Leistung	Leistungsfaktor ($\cos\varphi$)
3 Wattmeter, Fig. 54, I	$A_I + A_{II} + A_{III}$	$\cos\varphi = \frac{A}{J \cdot E}$	$A_I + A_{II} + A_{III}$	$\cos\varphi = \frac{A}{J \cdot E}$
1 Wattmeter, Fig. 54, II	$3A$	$\cos\varphi = \frac{A}{J \cdot E}$	—	—
2 Wattmeter, Fig. 55 u. 58	$A_I \pm A_{II}$	$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\frac{A_I - A_{II}}{A_I + A_{II}}$	$A_I \pm A_{II}$	unmöglich
1 Wattmeter, Fig. 61	$A_I \pm A_{II}$	$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\frac{A_I - A_{II}}{A_I + A_{II}}$	unmöglich	unmöglich

Anwendbare Methode	Dreiecksschaltung			
	gleiche Phasenbelastung		ungleiche Phasenbelastung	
	Leistung	Leistungsfaktor ($\cos\varphi$)	Leistung	Leistungsfaktor ($\cos\varphi$)
2 Wattmeter, Fig. 55 u. 58	$A_I \pm A_{II}$	$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\frac{A_I - A_{II}}{A_I + A_{II}}$	$A_I \pm A_{II}$	unmöglich
1 Wattmeter, Fig. 62	$A_I \pm A_{II}$	$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\frac{A_I - A_{II}}{A_I + A_{II}}$	$A_I \pm A_{II}$	—

Zu den vereinfachten Bestimmungen des Leistungsfaktors ($\cos\varphi$) mit Hilfe der Zwei-Wattmetermessungen aus der Beziehung: $\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\,\frac{A_I - A_{II}}{A_I + A_{II}}$ ist, wie schon erwähnt, die einschränkende Voraussetzung zu machen, daß sinusförmige Ströme und gleiche Belastung der drei Phasen vorhanden ist. Es ist aber immer das Bestreben der Elektrotechnik, namentlich die asynchronen Drehfeldmotoren mit möglichst sinusförmigem Strom zu betreiben, schon deshalb, weil dann ihr Leistungsfaktor den günstigsten Wert erhält. Da auch die drei Phasen bei solchen Motoren gleich belastet sind, so kann man aus den immer ohne Voraussetzungen anwendbaren Zwei-Wattmetermessungen auch gewöhnlich gleich den Leistungsfaktor berechnen.

Dritter Abschnitt.

Widerstandsbestimmung, Messung von Leitfähigkeiten und Temperaturkoeffizienten.

Widerstandsbestimmung.

Die Bestimmung des Ohmschen Widerstandes läßt sich immer am einfachsten mit Gleichstrom ausführen. In Fig. 65 ist die Schaltung dazu gezeichnet, wobei mit dem Voltmeter V der Spannungsverlust e gemessen wird, der bei dem Strom i, den man gleichzeitig mit dem Amperemeter bestimmt, in dem Widerstand x auftritt. Es ist dann

$$x = \frac{e}{i} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

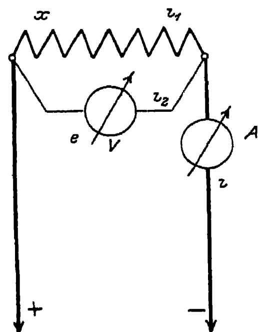


Fig. 65. Widerstandsmesung mit Volt- und Amperemeter.

Bei kleinen Widerständen muß man berücksichtigen, daß der Strom i, welchen das Amperemeter anzeigt, größer ist als der durch den Widerstand x fließende Strom i_1, weil durch das Amperemeter der Voltmeter-Strom i_2 mitgemessen wird. Es ist

$$i = i_1 + i_2$$

und
$$i_2 = \frac{e}{g},$$

wobei g der Widerstand des Voltmeters ist. In diesem Falle ist der unbekannte Widerstand:

$$x = \frac{e}{i - \frac{e}{g}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (15)$$

Eine andere Meßmethode ist möglich durch **Vergleichung der Spannungsverluste** in dem unbekannten Widerstand x und einem bekannten Widerstand r (Fig. 66), welcher ungefähr die gleiche Größe wie x haben muß. Ist e_x der Spannungsverlust im Widerstand x und e_r der in r, beides aber bei demselben Strom i (es muß also die Stromquelle konstante Spannung haben, sie besteht deshalb am besten aus Akkumulatoren), dann ist

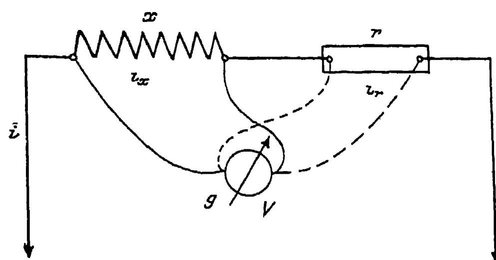


Fig. 66. Widerstandsmessung durch Vergleich.

$$\frac{r}{x} = \frac{\frac{e_r}{i}}{\frac{e_x}{i}} = \frac{e_r}{e_x}$$

und
$$x = r \cdot \frac{e_x}{e_r} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (16)$$

Bei einem Voltmeter mit proportionaler Teilung (Drehspul-Instrument) kann man für e_x und e_r einfach die Ausschläge α_x und α_r setzen, dann ist

$$x = r \cdot \frac{\alpha_x}{\alpha_r}.$$

Für sehr kleine Widerstände ist diese Vergleichung der Spannungsverluste ungenau, wenn r und x verschieden sind, weil dann der Strom i verschieden wird, je nachdem, ob das Voltmeter an x oder an r liegt. Man muß dann einen veränderlichen Wider-

stand r benutzen, den man einfach so lange ändert, bis $e_x = e_r$ ist, dann ist $x = r$.

Nullmethoden zur Widerstandsbestimmung.

Die älteste und bekannteste Nullmethode ist die Messung von Widerständen im **Wheatstone-Viereck** nach Fig. 67. Es sind drei bekannte Widerstände a, b und r mit dem unbekannten x zu einem Viereck verbunden, in dessen eine Diagonale AC die Meßbatterie E eingeschaltet ist, während ein Galvanometer G in der zweiten Diagonale BD, der sogenannten Brücke, liegt.

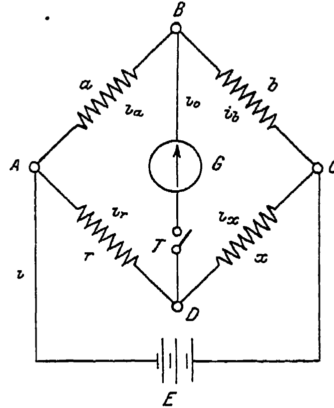


Fig. 67. Wheatstone-Viereck.

Wenn die Brücke stromlos ist, also $i_1 = 0$ ist, dann sind die Produkte der gegenüber liegenden Widerstände einander gleich, also:

$$a \cdot x = b \cdot r.$$

Daraus folgt für den unbekannten Widerstand:

$$x = r \cdot \frac{b}{a} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

Der Beweis ist folgender: Von A über B nach C geht die gleiche Spannung verloren wie von A über D nach C. Es ist also

$$i_a \cdot a + i_b \cdot b = i_r \cdot r + i_x \cdot x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (\text{VIII})$$

Wenn $i_1 = 0$ ist, dann muß sein

$$i_a = i_b \text{ und } i_r = i_x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (\text{IX})$$

Außerdem muß von A nach B derselbe Spannungsverlust auftreten, wie von A nach D, weil für $i_0 = 0$ zwischen B und D kein Spannungsunterschied bestehen kann, es ist also

$$i_a \cdot a = i_r \cdot r.$$

Aus Gleichung (VIII) folgt daher:

$$i_b \cdot b = i_x \cdot x.$$

Durch Teilen beider Gleichungen durcheinander erhält man

$$\frac{i_a \cdot a}{i_b \cdot b} = \frac{i_r \cdot r}{i_x \cdot x}$$

und unter Berücksichtigung von Gleichung (IX) folgt daraus:

$$\frac{a}{b} = \frac{r}{x}$$

und weiter die anfangs behauptete Beziehung:

$$a \cdot x = b \cdot r,$$

woraus dann Gleichung (17) entsteht. Bei der Ausführung der Messung benutzt man zwei veränderliche Widerstände, z. B. a und b, deren Werte so lange geändert werden, bis in der Brücke kein Strom mehr vorhanden ist, was man am Galvanometer erkennt, welches dann bei wiederholtem hintereinander ausgeführtem Schließen und Öffnen keinen Ausschlag mehr zeigen darf.

Häufig wird auch der Widerstand $a + b$ in Form eines Drahtes von überall möglichst gleichem Widerstand ausgeführt; damit dann das Verhältnis $\frac{b}{a}$ in Gleichung (17) geändert werden kann, ist der Punkt B (Fig. 67) als Gleitkontakt ausgebildet, welcher so lange verschoben wird, bis das Galvanometer stromlos ist. Man braucht dann die Größe des Widerstandes von b und a nicht zu kennen, weil ihre Widerstände sich verhalten wie ihre entsprechenden Längen auf dem Meßdraht. Hat z. B. das Widerstandsstück a die Länge l_1 und das Widerstandsstück b die Länge l_2 auf dem Meßdraht, so ist

$$\frac{b}{a} = \frac{l_2}{l_1}.$$

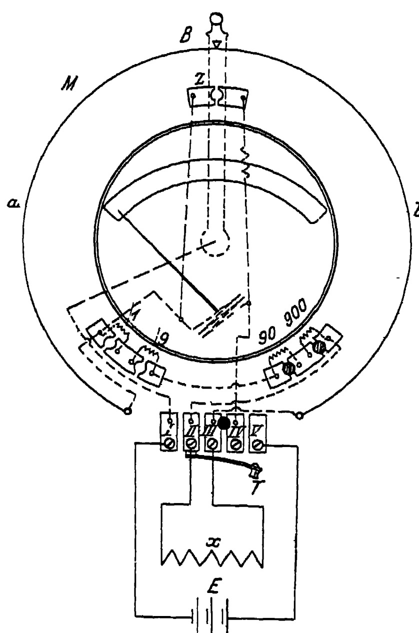


Fig. 68. Universalgalvanometer von Siemens & Halske.

Eine derartige Ausführung in runder Form zeigt Fig. 68, welche das **Universalgalvanometer** von Siemens & Halske darstellt. Das Galvanometer ist ein Drehspul-Instrument von Siemens & Halske (Prinzip Fig. 5), wodurch der Apparat

gleichzeitig für andere Messungen brauchbar wird. Der Widerstand r wird so gestöpselt, daß er entweder 1, 10, 100 oder 1000 Ω beträgt. In der Figur ist $r = 10$, weil die Widerstände 90 und 900 durch Stöpsel kurzgeschlossen sind. Ziehen des Stöpsels schaltet also hier den Widerstand ein. Durch Verschieben von B erreicht man, daß das Galvanometer beim Schließen des Tasters T keinen Ausschlag mehr gibt. Der Meßdraht M ist so geteilt, daß bei B gleich das Verhältnis $\frac{a}{b}$ abgelesen werden kann, dann ist

$$x = \frac{b}{a} \cdot r.$$

r wählt man möglichst in der Nähe des unbekannten Widerstandes; z. B. bei $x = 80$ würde man $r = 100$, nicht aber 10 oder 1000 wählen.

Bei schlecht gewähltem Vergleichswiderstand r werden auch die Abschnitte auf dem Meßdraht entsprechend verschieden, z. B. bei zu großem r gegen x wird nach der Gleichung $\frac{x}{r} = \frac{b}{a}$ das Stück a

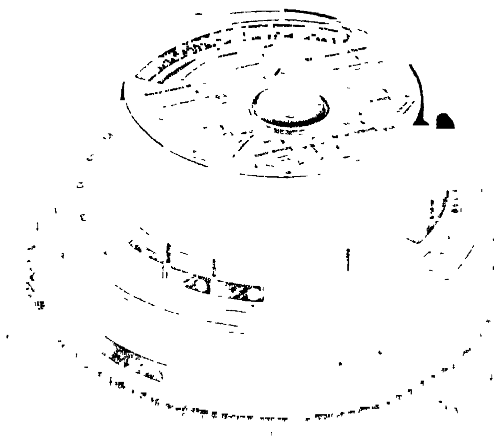


Fig. 69. Universalgalvanometer von Siemens & Halske.

des Meßdrahtes ebenfalls groß gegen x und der Schleifkontakt B rückt sehr weit nach dem rechten Ende des Meßdrahtes herüber, ehe die Brücke stromlos wird, wodurch die Messung ungenau wird,

weil das kleine Meßdrahtstück nicht genau bestimmt werden kann und weil auch die Schaltung dann am empfindlichsten ist, wenn der Schleifkontakt in der Mitte oder nicht zu weit davon steht. Für das Instrument nach Fig. 68, dessen Äußeres Fig. 69 zeigt, ist noch zu beachten, daß der Stöpsel zwischen III und IV gesteckt und der bei *z* gezogen sein muß. Auf dem Deckel des Instrumentes sind, wie Fig. 69 zeigt, alle für die verschiedenen Messungen, die das Instrument möglich macht, erforderlichen Schaltungen eingeätzt.

Die bisher angegebenen Methoden sind vorwiegend zur Messung von mittleren und größeren Widerständen ($1 \div 1000\,\Omega$) geeignet. Für kleine Widerstände (unter $1\,\Omega$) kann man diese Methoden nicht anwenden, weil die Zuleitungs- und Verbindungsdrähte sowie die Übergangswiderstände zu starken Einfluß haben. Die folgenden Methoden sind für kleine Widerstände geeignet.

Bei der Methode von Hockin & Matthiessen wird der Einfluß der Zuleitungen und Übergangswiderstände an den Kontaktstellen der Widerstände vollkommen ausgeschaltet. In Fig. 70 ist AC der Meßdraht, r der bekannte Vergleichswiderstand, welcher dem unbekannten Widerstand x entsprechend ebenfalls klein sein muß. Der Widerstand x sei z. B. ein dicker Draht (Kupferstab für Ankerwickelungen), dessen spezifische Leitfähigkeit bestimmt werden soll. Man grenzt dann auf dem Draht ein genügend langes Stück l_x ab und verbindet das Galvanometer mit einer Schneide, die man bei 1 auf den Kupferdraht aufsetzt, während der Schleifkontakt auf dem Meßdraht AC verschoben wird, bis das Galvanometer stromlos ist. Man findet so Punkt B_1. Darauf erfolgt eine zweite Messung, wobei die Schneide des Galvanometerdrahtes auf Punkt 2 aufgesetzt wird, jetzt bleibt das Galvanometer bei einem Punkt B_2 auf dem Meßdraht stromlos. Nun erfolgt noch

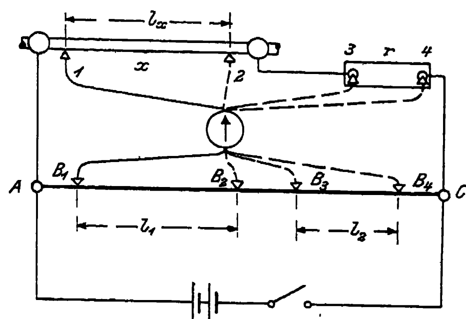


Fig. 70. Widerstandsmessung nach Hockin & Matthiessen.

eine dritte Messung, Schneide auf Punkt 3 aufgesetzt, wobei B_3 gefunden wird und schließlich die vierte Messung, Schneide auf Punkt 4 aufgesetzt, wobei B_4 gefunden wird. Bezeichnet man den Abstand der Punkte B_1 und B_2 in cm oder mm ausgedrückt mit l_1 und den Abstand von B_3 und B_4 in demselben Maßstab gemessen wie l_1 mit l_2, so ist der zwischen den Punkten 1 und 2 des Kupferstabes liegende Widerstand:

$$x = r\,\frac{l_1}{l_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (18)$$

Der Beweis ist folgender: In Punkt 1 ist das Potential V_1, entsprechend sind V_2, V_3, V_4 die Potentiale für 2, 3, 4. Bezeichnet man mit J_1 den Strom im Meßdraht AC, mit J_2 den Strom in x und r, so gilt

$$\left.\begin{aligned} V_1 - V_2 &= J_1 \cdot r_{l_1} = J_2 \cdot x \\ V_3 - V_4 &= J_1 \cdot r_{l_2} = J_2 \cdot r \end{aligned}\right\}$$

dabei sind r_{l_1} und r_{l_2} die den Längen l_1 und l_2 des Meßdrahtes entsprechenden Widerstände.

Durch Division erhält man

$$\frac{x}{r} = \frac{r_{l_1}}{r_{l_2}}$$

oder da die Widerstände r_{l_1} und r_{l_2} des Meßdrahtes als Teile ein und desselben Drahtes sich verhalten wie ihre entsprechenden Längen, so ist

$$\frac{x}{r} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Eine andere Schaltung zur Messung kleiner Widerstände ist die **Doppelbrücke von Thomson**, Fig. 71. AC ist der Meßdraht, dessen Widerstand und Temperaturkoeffizient (falls er nicht aus Manganin ist) genau bekannt sind; x ist der unbekannte Widerstand, die vier Widerstände a, b, c, d sind bekannte Vergleichswiderstände, welche zueinander die Beziehung haben müssen:

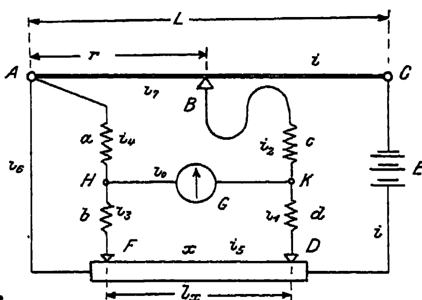


Fig. 71. Widerstandsmessung nach Thomson.

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}.$$

Bei richtiger Wahl dieses Widerstandsverhältnisses findet man durch Verschieben des Schleifkontaktes B einen Punkt auf dem Meßdraht, bei welchem das Galvanometer stromlos ist; in dem Fall gilt die Gleichung:

$$\frac{x}{r} = \frac{b}{a} = \frac{d}{c};$$

daraus folgt:

$$x = r \cdot \frac{b}{a} = r \cdot \frac{d}{c} \quad \ldots\ldots \quad (19)$$

Dabei ist r der dem Stück $A\,B$ des Meßdrahtes entsprechende Widerstand, der berechnet wird aus dem bekannten Gesamtwiderstand R und der Länge L aus der Gleichung:

$$r = R \cdot \frac{\overline{AB}}{L},$$

und x ist der durch die sogenannten Spannungsdrähte F und D abgegrenzte Widerstand des Stückes l_x.

Der Beweis für Formel (19) ist folgender. Aus Fig. 71 ergibt sich, wenn $i_0 = 0$ ist:

$$i_1 = i_2, \qquad i_3 = i_4,$$
$$i_1 + i_5 = i, \quad i_7 + i_2 = i,$$

folglich:

$$i_5 = i_7.$$

Ferner muß der Spannungsverlust von D nach K derselbe sein, wie von D über F nach H, und von H über A nach B muß ebenfalls der gleiche Spannungsverlust auftreten, wie von K nach B, also:

$$i_1 \cdot d = i_5 \cdot x + i_3 \cdot b,$$
$$i_1 \cdot c = i_3 \cdot a + i_5 \cdot r.$$

Dividiert man beide Gleichungen, so ergibt sich:

$$\frac{d}{c} = \frac{i_5 \cdot x + i_3 \cdot b}{i_3 \cdot a + i_5 \cdot r},$$

$$\frac{d}{e} \cdot i_3 \cdot a + \frac{d}{c} \cdot i_5 \cdot r = i_5 \cdot x + i_3 \cdot b;$$

setzt man für $\frac{d}{c}$ den Ausdruck $\frac{b}{a}$ ein, so wird:

$$\frac{b}{a} \cdot i_3 \cdot a + \frac{b}{a} \cdot i_5 \cdot r = i_5 \cdot x + i_3 \cdot b,$$

$$\frac{b}{a} \cdot i_5 \cdot r = i_5 \cdot x,$$

$$x = r \cdot \frac{b}{a} = r \cdot \frac{d}{c}.$$

Siemens & Halske führen die **Thomson-Brücke** nach Fig. 72 aus. M ist der Meßdraht, der aus Manganin hergestellt wird und ungefähr 0,01 Ω Widerstand hat. Manganin hat einen Temperaturkoeffizienten von $-$ 0,00005 % für 1° C; innerhalb der normalen Temperaturschwankungen bleibt also der Widerstand des Meßdrahtes praktisch unverändert. Die Teilung des Meßdrahtes ist so ausgeführt, daß bei der jeweiligen Stellung von B der Widerstand r am Meßdraht gleich abgelesen werden kann. T_1 und T_2 sind Taster für das Galvanometer und die Batterie. Mit der Siemensschen Doppelbrücke lassen sich Widerstände zwischen 0,000001 Ω und 0,1 Ω messen; es gilt die Gleichung (19) und es muß die Bedingung erfüllt sein: $\frac{b}{a} = \frac{d}{c}$.

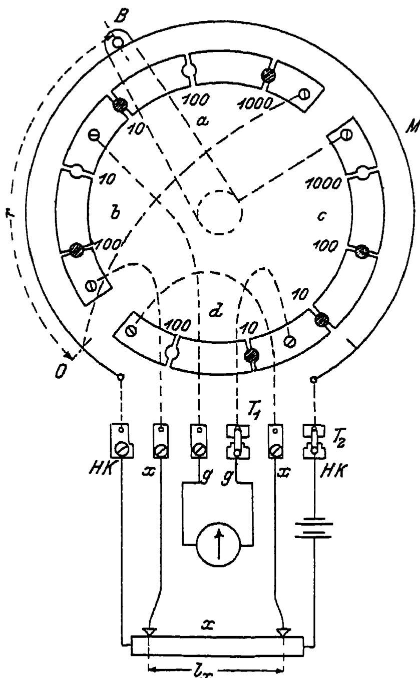


Fig. 72. Doppelbrücke von Siemens & Halske (Schaltung).

Das Äußere der Doppelbrücke von Siemens & Halske zeigt Fig. 73.

Hartmann & Braun führen eine **Thomson-Brücke** nach Fig. 74 aus; diese Brücke ist ebenfalls für die Messung von Widerständen zwischen 0,000001 und 0,1 Ω geeignet. Für Widerstände, welche größer als 0,1 Ω sind, wird die gestrichelte Schaltung ausgeführt, wodurch die Vergleichswiderstände vertauscht werden, so daß in diesem Fall die Gleichung gilt:

$$x = \frac{a}{b} \cdot r.$$

Für Widerstände unter 0,1 Ω gilt die normale Gleichung (19). Auch bei dieser Ausführung muß $\frac{b}{a} = \frac{d}{c}$ gemacht werden und der Widerstand r ist beim Schleifkontakt direkt ablesbar. Die Brücke besitzt bei K besondere Einspannklemmen, um dicke Kupfer-

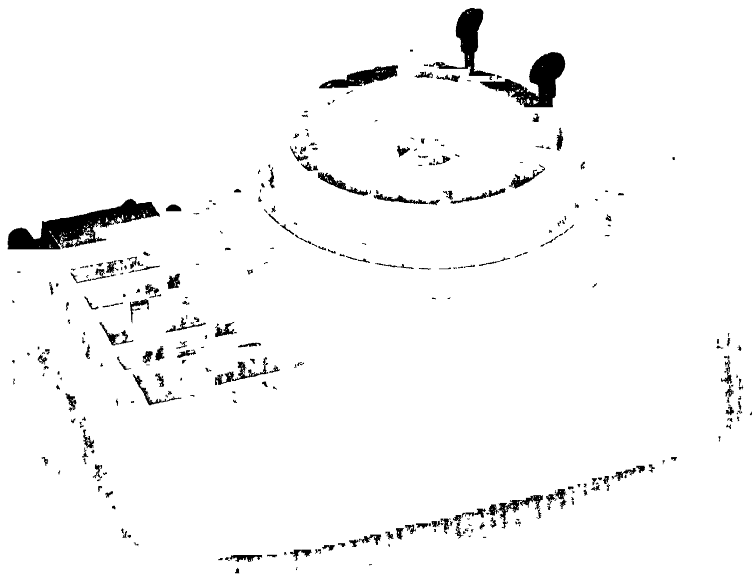


Fig. 73. Ansicht der Doppelbrücke von Siemens & Halske.

stäbe einzuspannen und ihre Spannungsdrähte sind mit Schneiden S versehen, deren Abstand l voneinander, ebenso wie in Fig. 72, maßgebend für den gemessenen Widerstand ist.

Bestimmung der Leitfähigkeit.

Sämtliche vorerwähnten Methoden (Fig. 70, 71 und die Ausführungen 72, 73, 74) eignen sich zur Messung der Leitfähigkeit von kurzen, dicken Drähten, z. B. Kupferstäben oder Drahtstücken für Ankerwickelungen.

Ist l_x die durch die Spannungsdrähte abgegrenzte gemessene Länge des zu untersuchenden Drahtes (Fig. 72 und 74) in Metern

und ist $q = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$ der Querschnitt in mm², so ist der spezifische

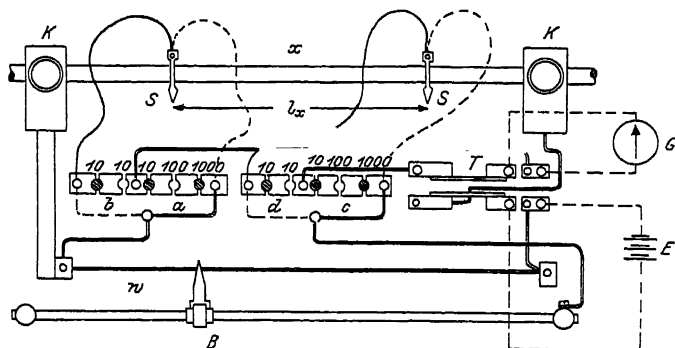


Fig. 74. Doppelbrücke von Hartmann & Braun.

Widerstand oder der Widerstand von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt des Drahtmaterials:

$$c = \frac{x \cdot q}{l_x}$$

und die spezifische Leitfähigkeit:

$$\lambda = \frac{1}{c} = \frac{l_x}{x \cdot q} \quad . \quad . \quad (20)$$

Der Querschnitt q des Drahtes wird durch Bestimmung des Durchmessers d ermittelt, der an möglichst vielen Stellen zu messen ist, und für den dann der Mittelwert einzusetzen ist. Genauer ist die Bestimmung von q direkt durch Wägung. Der Draht wird zuerst in der Luft gewogen, sein Gewicht sei G_l; darauf bestimmt man sein Gewicht unter Wasser nach Fig. 75, es sei G_w, dann ist nach dem Archimedesschen Prinzip der Rauminhalt des Drahtes in dcm³:

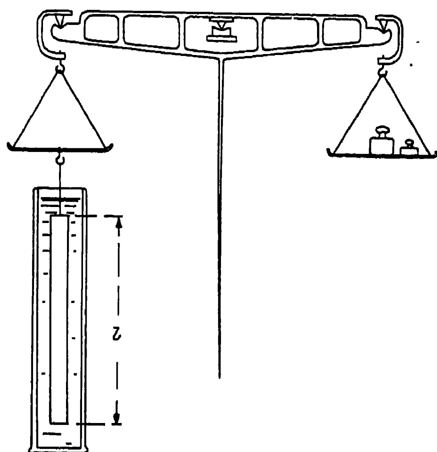


Fig. 75. Bestimmung des Drahtquerschnittes durch Wägung.

$$V = G_l - G_w,$$

wobei G_l und G_w in kg einzusetzen sind, und der mittlere Querschnitt wird

$$q = \frac{V}{l} \cdot 100^2 \text{ in } mm^2,$$

wenn l in mm gemessen wird.

Derartige Bestimmungen der Leitfähigkeit können ausgeführt werden zur Kontrolle der Kupferlieferanten, welche die Kupferdrähte oder Stäbe für die Maschinenwickelungen liefern.

Bestimmung von Temperaturkoeffizienten.

Der Temperaturkoeffizient (α) ist die Änderung, welche 100 Ohm eines Leitungsmateriales erfahren bei einer Temperaturänderung um 1° C. Man drückt deshalb α gewöhnlich in Prozenten aus.

Es ergibt sich die Bestimmung von α aus **zwei Widerstandsmessungen bei verschiedenen Temperaturen.** Es sei

r_1 der Widerstand bei der Temperatur t_1,
r_2 ,, ,, ,, ,, ,, t_2,

so wird daraus

$$\alpha = \frac{\left(\frac{r_2}{r_1} = 1\right) \cdot 100}{t_2 - t_1} \% \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (21)$$

Als Widerstandsmeßmethoden sind die Thomsonsche Brücke oder auch Hockin und Matthiessen geeignet; erstere ist besser, weil nur eine Einstellung des Gleitkontaktes nötig ist. Der Draht, dessen Temperaturkoeffizient bestimmt werden soll, wird in ein Petroleumbad gelegt, dessen Temperatur mit dem Thermometer gemessen wird, und gleichzeitig sein Widerstand bestimmt. Darauf erwärmt man den Draht, indem man das Petroleumgefäß in ein Wasserbad setzt, welches erhitzt wird, am besten bis zum Sieden des Wassers, weil während des Siedens die Temperatur konstant bleibt und deshalb in dieser Zeit bequem die zweite Widerstandsmessung des Drahtes und die zweite Temperaturmessung des Petroleumbades vorgenommen werden kann. Man muß, damit der Draht auch sicher dieselbe Temperatur angenommen hat wie das Petroleum, mit der zweiten Messung einige Zeit bis nach dem Beginn des Siedens warten.

Vierter Abschnitt.

Bestimmung der Wechselzahl und Wellenzahl von Wechselströmen, Bestimmung der Umlaufszahl elektrischer Maschinen und der Schlüpfung bei asynchronen Drehfeldmaschinen.

Ältere Methoden zur Messung der Wechselzahl eines Wechselstromes sind die **stroboskopischen Methoden.** In Fig. 76 ist eine solche gezeichnet. Ein kleiner Elektromotor trägt auf seiner Welle eine Scheibe A, welche mit einem schwarzen Sektor versehen ist. Der Wechselstrom, dessen Wechselzahl bestimmt werden soll, wird durch eine Bogenlampe geleitet, die so oft aufleuchtet, als der

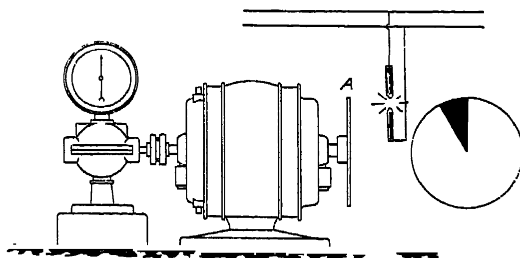


Fig. 76. Stroboskopische Bestimmung der Wechselzahl.

Strom seine Richtung wechselt. Da die Wechselzahl sehr groß ist, 80 bis 120 in der Sekunde, so ist das Aufleuchten der Lampe dem Auge nicht mehr wahrnehmbar, sie leuchtet scheinbar kontinuierlich. Dreht sich die Scheibe A, so wird man bei gewöhnlichem Licht den Sektor nicht mehr erkennen, bei Wechselstromlicht wird sie aber, wenn ihre Umlaufszahl in einem bestimmten Verhältnis zur Wechselzahl steht, einen oder mehrere Sektoren deutlich erkennen lassen. Dreht sie sich gerade einmal herum, wenn der Strom einmal wechselt, dann sieht man nur den einen Sektor, weil dieser im Augenblick des Aufleuchtens der Lampe immer an derselben Stelle angekommen ist. Dreht sie sich nur $1/2$ mal herum, während eines Stromwechsels, so erkennt man zwei Sektoren usf., es scheint dann, wenn genau diese Umlaufszahlen vorhanden sind, die Scheibe oder der Sektor stillzustehen. Dreht sich aber die

Scheibe etwas schneller oder langsamer, so scheint sie sich mit oder gegen ihre Umlaufsrichtung langsam zu drehen, mit derselben, wenn sie schneller läuft, gegen dieselbe, wenn sie langsamer läuft. Die Umlaufszahl des die Scheibe drehenden Motors, welche regelbar sein muß, wird so eingestellt, daß die Sektoren scheinbar stillstehen. Der Motor ist mit einem Umlaufszähler gekuppelt und die Wechselzahl des Stromes ergibt sich bei scheinbarem Stillstand der Sektoren zu:

$$\text{Wechsel} = \frac{n}{60} \cdot S,$$

wenn n die durch den Umlaufzähler angegebene Umdrehungszahl in einer Minute ist und die Periodenzahl oder Wellenzahl des Wechselstromes beträgt

$$\nu = \frac{nS}{120} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (22)$$

Ein sehr bequemer Apparat zum Bestimmen der Wechselzahl ist der Frequenzmesser nach Kempf von Hartmann & Braun. Er beruht nach Fig. 77 auf einer durch einen Wechselstrommagneten bewegten Gruppe von Stahlzungen. Der zu untersuchende Wechselstrom wird durch eine Spule S geleitet, die einen aus Eisenblech aufgebauten Magnetkörper E umfaßt. Vor den Polen dieses Magnetkörpers sind eine Anzahl Stahlzungen Z eingespannt, so daß sie mit dem einen Ende frei schwingen können. Die Stahlfedern sind verschieden lang und das Wechselfeld des Eisenkörpers versetzt sie in Schwingungen. Diese Schwingungen sind aber nur dann deutlich erkennbar, wenn die Wechselzahl des Feldes mit der natürlichen Schwingungszahl der Feder übereinstimmt. In Fig. 78 ist der photographisch ermittelte Zusammenhang zwischen der Schwingungsweite der Feder und der Wechselzahl des Stromes dargestellt, für eine Feder, deren natürliche Schwingungszahl 90 beträgt. Man erkennt, daß solch eine Feder

Fig. 77. Zungensystem bei einem Frequenzmesser nach Hartmann-Kempf.

sehr scharf die ihr zukommende Wechselzahl anzeigt, denn schon bei 89,5 Wechseln schwingt sie nur noch halb so weit als bei 90.

Die Ausführung eines solchen Zungenfrequenzmessers zeigt Fig. 79. Hinter einem Ausschnitt der Skala liegt die Zungen-

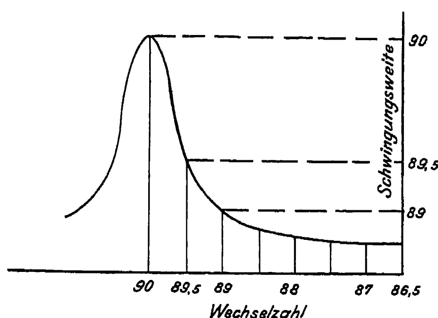


Fig. 78. Schwingungsweite, abhängig von der Wechselzahl.

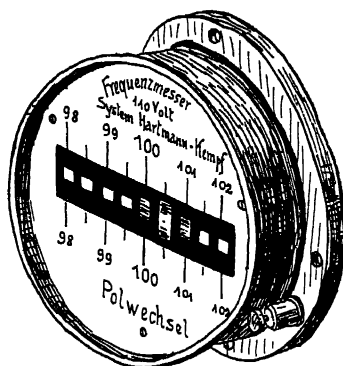


Fig. 79. Zungenfrequenzmesser von Hartmann & Braun.

reihe. Die einzelnen Federn tragen oben, damit sie gut sichtbar sind, kleine weiße Plättchen und der Apparat ist innen mit schwarzer Farbe gestrichen. In Fig. 79 ist angenommen, daß die Polwechselzahl 100,5 beträgt, es schwingt daher diese Feder sehr deutlich, während die links und rechts daneben liegenden auch noch mitschwingen, aber längst nicht so stark.

Während früher die Firma Hartmann & Braun nur die eben beschriebenen, auf dem Resonanzprinzip beruhenden Zungenfrequenzmesser ausführte, stellt sie daneben heute auch für besondere Zwecke einen Frequenzmesser her, der, auf elektrodynamischem Prinzip beruhend, mit einem Zeiger versehen ist und auf einer Teilung wie ein anderes Meßinstrument die Wechselzahl anzeigt. Die Schaltung dieses

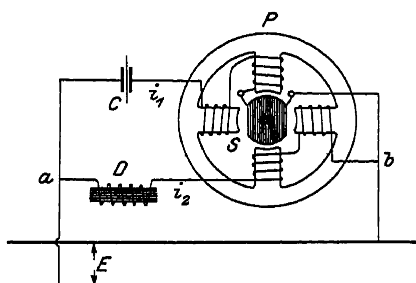


Fig. 80. Schaltung des Zeigerfrequenzmessers von Hartmann & Braun.

Instrumentes, welches im Aufbau dem in Fig. 36 beschriebenen Phasenmesser sehr ähnlich ist, aber eine andere Schaltung besitzt, zeigt Fig. 80.

Der Apparat ist an die Spannung E angeschlossen und besteht aus zwei zwischen den Punkten a und b liegenden Stromkreisen, deren einer aus einem Kondensator C, zwei Polen des Eisenkörpers P und der beweglichen Spule S besteht, während sich der andere Kreis aus der Drosselspule D und den beiden anderen Polen von P zusammensetzt. Die Teilung dieser Zeigerfrequenzmesser, welche für folgende Meßbereiche hergestellt werden:

25— 30— 35	Polwechsel
45— 50— 55	„
65— 70— 75	„
90—100—110	„
110—120—130	„
30— 75—120	„

ist annähernd proportional. Eine Abhängigkeit der Angaben von der Temperatur ist nicht vorhanden. Spannungsänderungen haben bis zu $\pm 30\%$ auch keinen Einfluß, ebenso nicht die Kurvenform des Wechselstromes.

Siemens & Halske führen Frequenzmesser aus, die nach dem System Frahm ausgebildet sind, wobei ebenfalls eine Reihe Federn vor einem Magneten steht, der aber eine andere Ausführung als bei Fig. 77 besitzt. Die Instrumente beruhen ebenfalls auf dem Resonanzprinzip und ihr Äußeres ist ähnlich wie Fig. 79.

Bestimmung der Umlaufszahl elektrischer Maschinen.

Die Umlaufszahl von Maschinen wird gewöhnlich mit den bekannten Umlaufzählern oder mit den sogenannten Tachometern bestimmt. Die Umlaufzähler besitzen ein kleines aus Zahnrädern bestehendes Zählwerk und werden eine bestimmte Zeit lang, meist eine Minute, an die Welle der Maschine gehalten. Die Tachometer zeigen dagegen die augenblickliche Umdrehungszahl, bezogen auf die Minute, mit einem Zeiger auf einer Skala an. Sie beruhen meist auf der Wirkung der Fliehkraft und sind bequemer als die Umlaufzähler, weil man nicht erst eine Minute lang zu zählen braucht, sondern sofort beim Anhalten des Apparates an die Welle die Umdrehungszahl erkennt und außerdem jede Schwankung in der

Tourenzahl auch am Zeiger sichtbar wird. Besonders zuverlässig sind die elektrischen Tachometer und Ferntachometer. Bei diesen wird durch die zu messende Maschinenwelle eine kleine magnetelektrische Maschine angetrieben. Diese besitzt Stahlmagnete, also ein konstantes Feld, in dem sich ein kleiner Anker dreht, dessen Spannung dann genau proportional der Umlaufszahl ist. Mit diesem Anker verbindet man ein Voltmeter, welches aber eine Teilung besitzt, auf der die Umdrehungen abgelesen werden.

Die Tachometer besonders und auch schon die Tourenzähler verbrauchen Arbeit zu ihrer Bewegung. Bei großen Maschinen ist natürlich der Betrag dieser Arbeit vollständig verschwindend. Bei kleinen Maschinen, unter 1 PS, kann man sie aber aus diesem Grunde nicht mehr verwenden, weil sie die Maschinen in unkontrollierbarer Weise belasten. Es ist deshalb notwendig, für kleine Maschinen besondere Methoden anzuwenden.

Eine Methode, bei der gar keine Arbeit von der zu messenden Maschine zum Tourenzählen verbraucht wird, ist die stroboskopische Zählung der Umläufe. Sie eignet sich also ganz besonders gut für kleine und kleinste Maschinen (Nähmaschinenmotoren, Ventilatormotoren). Der zu untersuchende Motor erhält eine Scheibe A nach Fig. 81 auf die Welle gesetzt, welche auf einem Viertel schwarz ist, während der übrige Teil weiße Farbe hat. Die Scheibe B, welche ganz weiß ist, aber einen Ausschnitt besitzt, kommt auf die Welle eines kleinen Hilfsmotors, dessen Tourenzahl regelbar ist und der nach Fig. 76 mit einem Tachometer gekuppelt ist. Beide Motoren werden mit ihren Wellen in eine Richtung gestellt, die Scheiben A und B einander zugekehrt. Die Drehrichtung beider Scheiben muß entgegengesetzt sein, dann tritt bei gleicher Umlaufszahl beider Maschinen der Ausschnitt der Scheibe B immer wieder in der gleichen Stellung vor das schwarze Segment von A und das Segment steht scheinbar still. Dreht sich B etwas zu schnell, so verschiebt sich das Segment scheinbar langsam in der Drehrichtung von B, umgekehrt dreht es sich bei zu geringer Geschwindigkeit. Dreht sich B noch einmal so schnell als A, so erscheint das Segment zweimal, aber wenn das

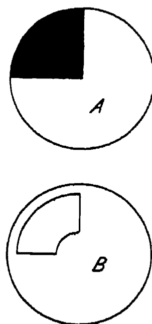


Fig. 81. Stroboskopische Scheiben zum Tourenzählen.

Verhältnis der Umläufe genau wie 1:2 ist, stehen die beiden Segmentbilder wieder scheinbar still, während sie sich in der Nähe der betreffenden Umlaufszahl langsam zu drehen scheinen, ebenso wie schon vorhin angegeben.

Allgemein erhält man die Umlaufszahl n des untersuchten Motors aus der Gleichung:

$$n = \frac{n_1}{S} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (23)$$

Dabei ist S die scheinbare Anzahl der Segmente und n_1 die am Tachometer des Hilfsmotors abgelesene Umlaufszahl des letzteren.

Messung der Schlüpftouren bei asynchronen Drehfeldmotoren.

Bei asynchronen Drehfeldmotoren bezeichnen die Schlüpftouren die Differenz zwischen der synchronen Umlaufszahl und der Umlaufszahl des Läufers. Die synchrone Umlaufszahl ist bestimmt durch die Gleichung:

$$n_1 = \frac{\nu \cdot 60}{p},$$

dabei ist ν die Wellenzahl oder halbe Wechselzahl, welche nach den früher besprochenen Methoden gemessen werden kann, p die Zahl der Polpaare. Die Umlaufszahl des Läufers sei n_2, es sind dann die Schlüpftouren:

$$n_s = n_1 - n_2;$$

n_2 läßt sich mit dem Tourenzähler, Tachometer oder nach sonst einer der vorhin besprochenen Methoden bestimmen.

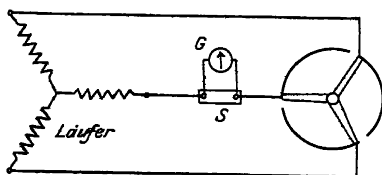


Fig. 82. Messung der Schlüpfung eines Drehfeldmotors mit polarisiertem aperiodischem Galvanometer.

Bei größeren Drehfeldmotoren wird die Messung der Schlüpftouren, besonders bei Leerlauf und schwacher Belastung, sehr leicht fehlerhaft durch Bestimmung mit dem Tourenzähler, weil die Zahl der Schlüpftouren solcher Motoren immer sehr gering ist und n_1 und n_2 wenig verschieden sind. Es läßt sich dann die Schlüpfung viel genauer messen nach Fig. 82. In eine der Leitungen, welche vom Läufer zum Anlasser führen, wird ein aperi-

odisches polarisiertes Galvanometer, am besten ein Drehspul-Gleichstrominstrument in der dann üblichen Weise parallel zu einem Meßwiderstand s (vgl. Fig. 8) geschaltet, welches für den Läuferstrom ausreichend ist. Das Galvanometer muß den Nullpunkt in der Mitte haben und führt je nach der Stromrichtung Ausschläge nach links oder rechts aus. Im Läufer des Drehfeldmotors entsteht ein Wechselstrom, dessen Wechselzahl abhängt von dem Unterschied der Umlaufszahlen des Drehfeldes und des Läufers, also von den Schlüpftouren. Da die Schlüpftouren immer geringer sind, so sind die Wechsel des Stromes im Läufer auch gering und so langsam, daß ein polarisiertes Gleichstrominstrument den Richtungsänderungen sehr gut folgen kann. Man braucht also nur die Hin- und Hergänge des Zeigers in einer Minute zu zählen und hat daraus die Zahl der Stromwechsel. Zählt man nur die Stromstöße N_1 nach einer Richtung, also die Wellen- oder Periodenzahl, so erhält man die Schlüpftouren zu

$$n_s = n_1 - n_2 = \frac{N_1}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

Dabei ist N_1 die Zahl der Stromstöße nach derselben Richtung, p die Zahl der Polpaare des Drehfeldmotors.

Bei stärkerer Belastung des Motors bleibt der Läufer mehr hinter der Umlaufszahl des Drehfeldes zurück, dann wird die Zahl der Schlüpftouren größer und das Galvanometer kann den jetzt schneller wechselnden Strömen im Läufer nicht mehr gut folgen. Man bestimmt dann n_2 am Läufer direkt mit dem Umlaufszähler.

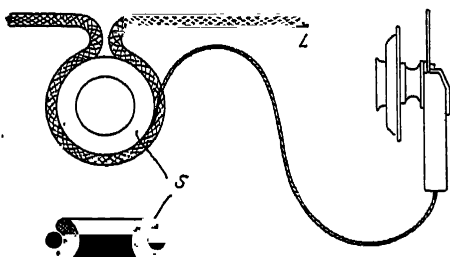


Fig. 83. Messung der Schlüpftouren mit Telephon und Induktionsspule.

Will man den Betrieb eines Motors nicht unterbrechen, was zum Einschalten des Galvanometers G in Fig. 82 notwendig wird, dann lassen sich die Schlüpftouren nach Dr. v. Hoor auch durch **Induktionsspule** und **Telephon** messen (Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1899, S. 211). Eine der drei Leitungen L, welche vom Läufer zum Anlasser führen, wird nach Fig. 83 in einer Schleife um die Induktionsspule S gewunden. Man hört dann im Telephon die

Zahl der Strommaxima oder Wechsel und wenn diese mit N pro Minute bezeichnet werden, ergibt sich die Zahl der Schlüpftouren zu

$$n_s = n_1 - n_2 = \frac{N}{P} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

Dabei ist P die Zahl der Pole des Motors (nicht wie in Formel 24 die Zahl der Polpaare, denn dort zählt man die Wellenzahl des Stromes, durch die Stromstöße nach einer Richtung, hier zählt man die Wechselzahl).

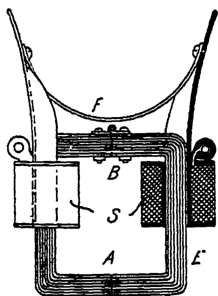


Fig. 84. Apparat von Dietze.

Noch einfacher läßt sich die eben beschriebene Methode mit einem Apparat nach Dietze, ausgeführt von Hartmann & Braun, anwenden. Ein nach Fig. 84 aus Blech hergestellter, bei B mit Gelenk versehener Eisenblechkörper E läßt sich durch Druck auf die Griffe bei A aufklappen und kann dann über die stromführende Leitung geschoben werden. Die Feder F schließt den Eisenkörper wieder und dieser nimmt nun das Magnetfeld des Stromes im Draht auf, so daß dadurch bei Schwankungen des Stromes und damit des Feldes die beiden Spulen S induziert werden, deren Stromstöße ebenfalls mit dem Telephon gehört werden können. Sonst ist die Methode dieselbe wie die nach Fig. 83.

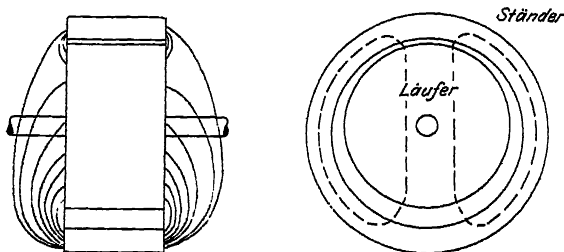


Fig. 85. Streufeld bei exzentrischer Läuferlagerung.

Um auch bei kleineren Motoren die Schlüpfung für Leerlauf und schwache Belastung genau ermitteln zu können, schlägt Rosenberg (Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1899, S. 327) die Benutzung des Streufeldes vor. Jeder Motor hat kleine Un-

regelmäßigkeiten, z. B. Stellen mit weicherem oder härterem Eisen, die dann verschieden stark magnetisiert sind, auf Läufer und Ständer, welche eine ähnliche Wirkung auf das Streufeld haben, als eine exzentrische Lagerung nach Fig. 85. Es treten dann mit regelmäßiger Wiederholung während einer Umdrehung Schwankungen der Feldstärke ein, die etwa nach Fig. 86 verlaufen. Aus dieser Kurve folgt, daß sie wegen ihrer Form die beiden Hauptstöße schwer mit dem Telephon erkennen läßt, weil noch kleine Schwankungen vorhanden sind.

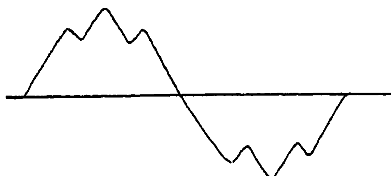


Fig. 86. Schwankungen des Streufeldes.

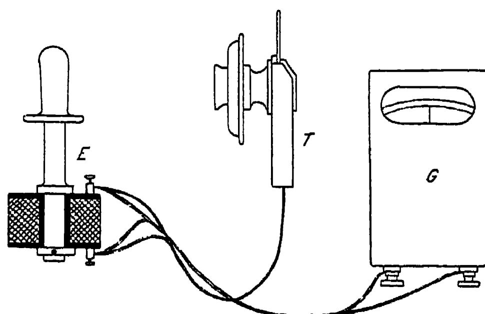


Fig. 87. Spule mit Telephon und polarisiertem Galvanometer.

Man schaltet deshalb an die Spule E, die mit Griff versehen ist, und einfach von außen möglichst nahe an den Luftspalt der Maschine zu halten ist, neben das Telephon T noch ein polarisiertes Galvanometer G nach Fig. 87. Man erhält die beste Wirkung, wenn der Widerstand der Spule R_s dieselbe Größe hat, wie der aus Telephon R_T und Galvanometer R_g resultierende; also für die Parallelschaltung von R_T und R_G in Fig. 87:

$$R_s = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{R_g}}.$$

Fünfter Abschnitt.

Widerstandsmessungen an elektrischen Maschinen. Prüfung der Isolierung. Bestimmung der Magnet- und Ankerwiderstände.

Prüfung der Isolierung.

Früher bestimmte man bei Maschinen und Apparaten zur Prüfung der Isolierung den Isolationswiderstand. Diese Messung wird heute nur bei Leitungsanlagen und Installation vorgenommen, wo sie auch zweckmäßig ist. Der Isolationswiderstand einer elektrischen Maschine ist aber für die Güte der Isolierung nicht immer maßgebend. Man prüft deshalb die Maschinen schon während ihres Zusammenbaues in der Fabrik daraufhin, ob sie die ihnen später zukommende Spannung aushalten.

Eine einfache Gleichstromprüfung mit doppelter oder höherer Spannung als die normale Betriebsspannung, anwendbar bei fertigen Ankern und Magnetgestellen, zeigt Fig. 88. Zum Schutz gegen zu starken Strom infolge Durchschlagens der Isolation wird ein Widerstand W in die Leitung gelegt. Ist die Isolation der Wickelung gegen das Eisen des Ankers gut, dann ist $i = 0$ oder jedenfalls verschwindend klein und die volle Spannung $E_1 = E$ wirkt auf die Isolierung. Wird an irgend einer Stelle die Isolierung durchschlagen, so entsteht ein stärkerer Strom, der aber wegen des Widerstandes W keine gefährliche Höhe erreichen kann. Die durchgeschlagene Stelle wird sichtbar durch die dort auftretende Rauchbildung und durch Schwarzbrennen der Isolierung. Dasselbe Verfahren kann man auch anwenden, um die Isolierung der einzelnen Spulen eines Gleichstromankers gegeneinander zu messen, bevor der Kommutator am Anker befestigt ist.

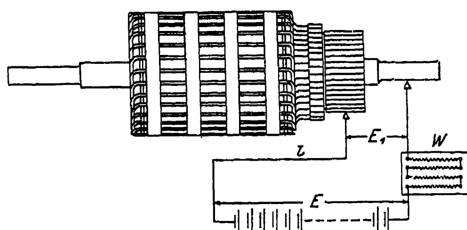


Fig. 88. Prüfung der Isolierung mit Gleichstrom.

Noch zweckmäßiger, weil wirksamer, ist die Prüfung der Isolierung mit Wechselstrom. Man läßt nach Fig. 89 die

Sekundärspannung der Wickelung S_2 eines kleinen Transformators auf die Isolation wirken. Die Primärspule S_1 des Transformators wird durch einen kleinen Wechselstromgenerator G erregt, der mit einem Gleichstrommotor M gekuppelt ist. Durch Veränderung der Umlaufszahl von M und durch Regulieren des Magnetstromes von G ist die Primärspannung in weiten Grenzen veränderlich, und

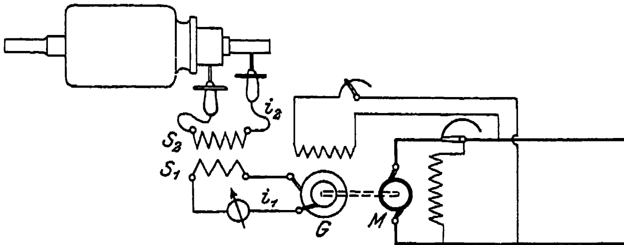


Fig. 89. Prüfung der Isolierung mit Wechselstrom.

die Sekundärspannung, die durch die Wickelung S_2 herauftransformiert wird, kann auf beliebige Werte eingestellt werden. Ist die Isolation gut, so bleibt der Strom $i_2 = 0$ oder entsprechend dem Isolationsstrom außerordentlich schwach. Beim Durchschlagen der Isolation entsteht aber ein starker Strom i_2, der sofort durch gleichzeitiges starkes Anwachsen des Primärstromes i_1 bemerkt wird. Der Strom i_2 erhitzt schließlich die schadhafte Stelle und macht sie dadurch in derselben Weise kenntlich, wie bei der vorigen Methode.

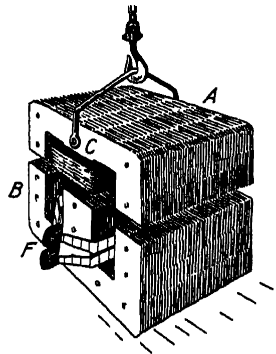


Fig. 90. Prüfeinrichtung für Anker und Feldspulen.

Magnetspulen und Formspulen für Anker können in einer Einrichtung nach Fig. 90 geprüft werden. Man legt die fertig gewickelten Spulen F über den mittleren Kern des Unterteiles B und setzt dann das Oberteil A auf, welches eine Spule besitzt, an die Wechselstrom angeschlossen wird. Diese Spule ist also die Primärwickelung eines Transformators, dessen Sekundärwickelung die aufgeschobenen Formspulen F sind. Ist die Isolierung dieser Spulen, in denen durch das Wechselfeld elektromotorische Kräfte

induziert werden, gut, so entsteht in ihnen kein Strom, weil ihre Enden offen sind. Sobald aber infolge eines Isolierfehlers an einer Stelle ein Durchschlag erfolgt, entsteht bei dem geringen Widerstand der Spulen ein stärkerer Strom, der den Transformator sekundär belastet und sofort sichtbar wird, wenn man in die Primärspule ein Amperemeter schaltet. Dieses zeigt durch Steigen des Zeigerausschlags einen erfolgten Durchschlag an.

Mit dem Prüftransformator von Siemens & Halske nach Fig. 91 kann man ebenfalls die eben beschriebene Prüfung vornehmen. Der Transformator besteht aus zwei Teilen, dem unteren U-förmigen Teil B, welcher bei C die Primärspule besitzt, und dem oberen abnehmbaren Jochstück A, über welches die zu prüfenden Formspulen F zu mehreren nebeneinander geschoben

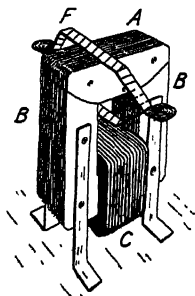


Fig. 91. Prüftransformator von Siemens & Halske.

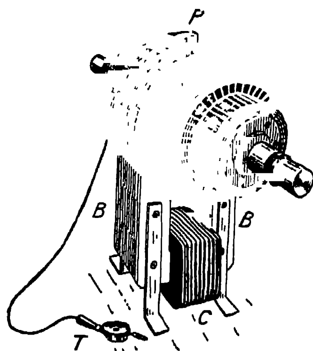


Fig. 92. Prüfen eines Ankers.

werden können. Die Firma Siemens & Halske liefert zur Veränderung der Induktion in den Prüfspulen einen besonderen Reguliertransformator, an den man die Spule C anschließt. Um damit bequem in der Werkstatt umherfahren zu können, ist der Reguliertransformator mit Anschlußvorrichtungen an ein Wechselstromnetz und den nötigen Regelungsapparaten und Meßinstrumenten in einem kleinen Wagen angeordnet. Für die Prüfung von Formspulen allein würde diese fahrbare Einrichtung überflüssig sein, da man diese ohne weiteres zum Prüftransformator hinbringen kann, weil sie leicht sind. Der Transformator dient aber auch zum Prüfen ganzer Anker. Dies geschieht nach Fig. 92 durch Auf-

setzen des Ankers auf den Magneten von Fig. 91, dessen Oberteil *A* abgenommen wurde oder auch durch das umgekehrte Verfahren nach Fig. 94. Ein erfolgter Isolationsdurchschlag wird auch hier wieder durch ein Ansteigen des Primärstromes in der Spule des Magneten angezeigt. Um die schadhafte Spule selbst zu finden, benutzt man in Fig. 94 ein kleines Eisenstück *E*, dieses wird, sobald man es über eine schadhafte Spule bringt, durch deren Magnetfeld angezogen. Durch Drehen des Ankers und Aufsetzen des Transformators auf immer neue Stellen kann man alle Spulen der Reihe nach untersuchen. Um aber auch sehr geringe Isolationsfehler, deren Widerstand nur einen schwachen Strom in der betreffenden Spule zuläßt, finden zu können, führen Siemens & Halske die Einrichtung nach Fig. 93 aus. Man setzt dann, wie Fig. 92 zeigt, oder in Fig. 94 an Stelle des Eisenstückes die kleine mit U-förmigem Eisenkörper versehene Induktionsspule auf den Anker und kann durch die Anwendung des Telephons schon geringe Durchschlagsströme erkennen.

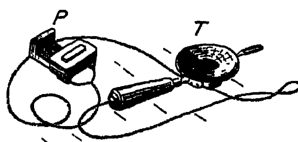


Fig. 93. Prüfspule mit Telephon.

Bei **Wechselstromankern** kann man sogar die Primärwickelung des Transformators sparen und nur einen unbewickelten Eisenblechkörper *K* auf den Ankerkörper nach Fig. 95 aufsetzen. Man muß dann eine der Ankerspulen, hier z. B. S_1 verwenden, um sie mit Wechselstrom zu speisen, der an ihre Enden *1* und *2* angeschlossen wird. Das Feld der Spule S_1 findet in *K* seinen Rückschluß und induziert in den umliegenden Spulen die Prüfspannung. Auch hier verwendet man zum Aufsuchen von schadhaften Spulen das Eisenstück *E*, welches z. B. von S_2 angezogen werden würde, wenn diese Spule durchgeschlagen ist. Den Körper *K* setzt man dann an genügend vielen Stellen des Ankers auf, so daß alle Spulen durchgeprüft werden.

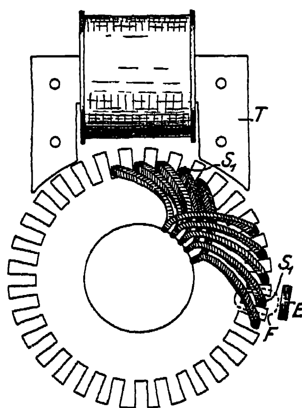


Fig. 94. Aufsuchen von schadhaften Spulen.

Durch die erforderliche Sekundärspannung, mit der geprüft werden soll, ergibt sich immer die Primärspannung. In Fig. 95 müssen z. B. beide gleich groß sein, das heißt, wenn z. B. die Spulen mit der dreifachen Spannung geprüft werden sollen, als diejenige ist, die jede einzelne Spule im Betriebe auszuhalten hat, so muß die gleiche Spannung an den Enden *1* und *2* der das Feld erregenden Spule S_1 angeschlossen werden. Kennt man die Verhältnisse des Transformators in Fig. 90, 91, 92, 94 nicht, so legt man an die offenen Enden einer Ankerspule, die unter dem Einfluß des Feldes steht, ein Voltmeter an und richtet nach dessen Angabe die Primärspannung des Transformators ein.

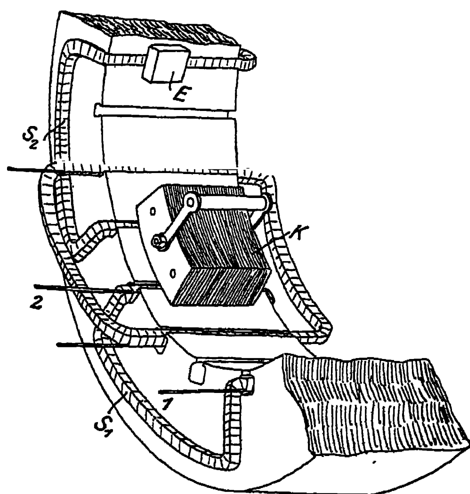


Fig. 95. Prüfung von Wechselstromankern.

Messung von Magnetwiderständen.

Die Widerstände der Magnetwickelungen lassen sich je nach ihrer Größe durch eine der unter Widerstandsbestimmung im dritten Abschnitt gegebenen Methoden messen.

Die Widerstände der Magnetwickelung von Gleichstrom-Nebenschlußmaschinen und synchronen Wechsel- und Drehstrommaschinen sind nach den für Widerstände mittlerer Größe in den Figuren 65, 66 und 67 erläuterten Methoden zu bestimmen. Am bequemsten ist die Messung der Widerstände durch Bestimmung des Spannungsverlustes in denselben bei einer bekannten Stromstärke (Fig. 65).

Bei Bestimmung der **Magnetwiderstände in der Wheatstone-Brücke** (Fig. 67) ist zu beachten, daß die Magnetwickelung Selbstinduktion hat, bei einer Änderung der sie durchfließenden Strom-

stärke also der Ursprung für eine elektromotorische Kraft wird, welche störend auf das Galvanometer einwirkt. Man darf deshalb den Batteriestrom i (Fig. 67) nicht unterbrechen, weil selbst dann, wenn das Verhältnis der Widerstände: $\frac{a}{b} = \frac{r}{x}$ erfüllt ist, jedesmal beim Einschalten der Batterie das Galvanometer durch den Selbstinduktionsstrom einen Stoß erfährt. Man öffnet also den Batteriestrom nicht und ändert das Verhältnis der Widerstände so lange, bis das Galvanometer beim Schließen des Tasters T keinen Ausschlag mehr gibt, worauf Formel (17) angewendet wird.

Ohne einen Galvanometertaster T lassen sich unbekannte Widerstände x mit Selbstinduktion überhaupt nicht messen. Denn sobald man, was z. B. in Fig. 68 der Fall ist, den Meßstrom mit dem Taster T öffnet, um zu erkennen, ob die Brücke stromlos bleibt, würde man sowohl beim Öffnen als beim Schließen in dem Widerstand x selbst elektromotorische Kräfte erhalten, auch dann, wenn das Verhältnis der Widerstände richtig ist. Man darf also den Strom der Meßbatterie überhaupt nicht unterbrechen und nur durch den Galvanometertaster sich überzeugen, ob die Brücke stromlos ist. Falls letzteres eingetreten ist, würde durch Öffnen und Schließen des Galvanometertasters der Batteriestrom nicht mehr geändert werden, also auch keine Selbstinduktion in x auftreten können.

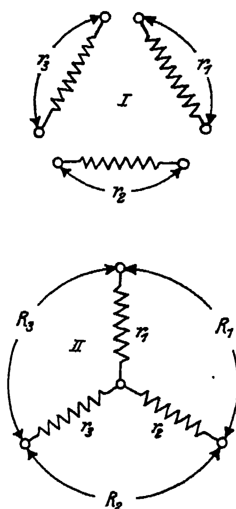


Fig. 96. Widerstandsmessung bei Dreiecks- und Sternschaltung.

Die **asynchronen Drehstrommaschinen** haben Magnetwickelungen in Dreiecks- oder Sternschaltung. Sodann sind die Ohmschen Widerstände dieser Wickelungen meist klein, so daß als Meßmethoden in Betracht kommen diejenigen nach den Fig. 65, 70 und 71 mit den Apparaten in Fig. 72 und 74.

In Fig. 96 *I* ist die Dreiecksschaltung gezeichnet. Zur Bestimmung der einzelnen Phasenwiderstände r_1, r_2, r_3 muß die Verbindung der Phasen geöffnet werden.

Bei Sternschaltung in Fig. 96 *II* können, wenn der Knotenpunkt zugänglich ist, ebenfalls die Phasenwiderstände r_1, r_2, r_3 einzeln gemessen werden. Ist der Knotenpunkt nicht zugänglich, dann müssen die verketteten Widerstände gemessen werden:

$$R_1 = r_1 + r_2,$$
$$R_2 = r_2 + r_3,$$
$$R_3 = r_3 + r_1.$$

Hieraus ergeben sich durch Einsetzen die Werte der einzelnen Phasen zu:

$$r_1 = \frac{R_1 + R_3 - R_2}{2},$$

$$r_2 = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2},$$

$$r_3 = \frac{R_3 + R_2 - R_1}{2},$$

Messung von Magnetwiderständen während des Betriebes.

Die Magnetwiderstände von allen Maschinen, welche Gleichstrom für die Magnetisierung verwenden, können während des Betriebes nach der Methode in Fig. 65 gemessen werden. Je nach der Schaltung der Maschine ist die Messung verschieden.

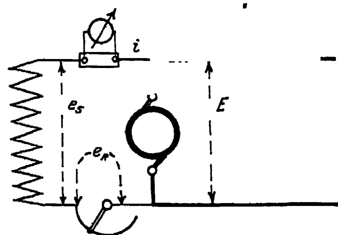


Fig. 97. Messung der Nebenschlußwickelung während des Betriebes.

Für die **Nebenschlußmaschine** zeigt Fig. 97 die Messung. Es wird der Strom i bestimmt und gleichzeitig mit einem Voltmeter der Spannungsverlust e_s gemessen, dann ist der Widerstand der Magnetwickelung: $r_s = \frac{e_s}{i}$.

Ebenfalls läßt sich der Widerstand R_r im Nebenschlußregler durch Messung von e_R bestimmen. Beide Messungen sind während des Betriebes ausführbar, weil nur die Voltmeterdrähte an die betreffenden Punkte zu halten sind. Es ist in Fig. 97: $E = e_R + e_s$, folglich $R_r = \frac{e_R}{i}$.

Ähnlich läßt sich der **Widerstand der Magnetwickelung bei einer Hauptstrommaschine** nach Fig. 98 bestimmen. Dort ist der Widerstand r_s der Magnetwickelung w_s:

$$r_s = \frac{e_s}{J}.$$

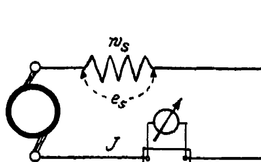


Fig. 98. Messung des Magnetwiderstandes der Hauptstrommaschine.

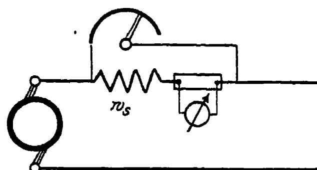


Fig. 99. Messung des Magnetenwiderstandes der Hauptstrommaschine mit Regler.

Besitzt die Hauptstrommaschine einen Regulierwiderstand zur Regelung ihrer Spannung, parallel zu ihrem Magnetwiderstand, dann ist nach Fig. 99 das Amperemeter so zu schalten, daß nur der Strom gemessen wird, der durch r_s allein hindurchgeht.

Bei **Maschinen mit gemischter Schaltung** wendet man die Schaltungen in

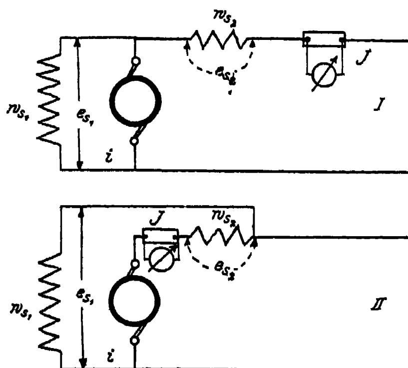


Fig. 100. Messung der Magnetwiderstände bei Maschinen mit gemischter Schaltung.

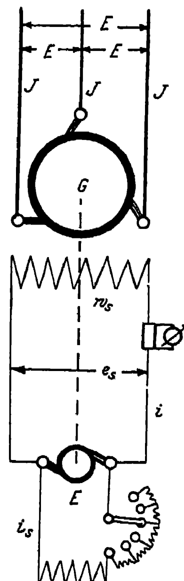


Fig. 101. Messung des Magnetwiderstandes bei synchronen Wechsel- und Drehstrommaschinen.

Fig. 100 an. Liegt der Nebenschluß direkt an den Bürsten, wie in Fig. 100 *I*, dann ist ohne weiteres der äußere Strom *J* zu messen; bei Fig. 100 *II* muß dagegen das Amperemeter so geschaltet werden, daß nur der Strom gemessen wird, welcher die Hauptstromwickelung durchfließt.

Bei beiden Maschinen ist der Widerstand r_{s_1} der Nebenschlußwickelung w_{s_1}:

$$r_{s_1} = \frac{e_{s_1}}{i}$$

und der Widerstand r_{s_2} der Hauptstromwickelung: w_{s_2} beträgt:

$$r_{s_2} = \frac{e_{s_2}}{i}.$$

In Fig. 101 ist noch die **Messung des Magnetwiderstandes einer synchronen Wechsel- oder Drehstrommaschine** angegeben. *G* ist die Wechselstrommaschine, *E* ihre Gleichstromerregermaschine. Es ist auch hier der Widerstand r_s der Magnetwickelung w_s während des Betriebes meßbar und es gilt

$$r_s = \frac{e_s}{i}.$$

Messung von Ankerwiderständen.

Ankerwiderstände sind immer sehr kleine Widerstände. Sie müssen deshalb nach den Methoden: Thomsonsche Doppelbrücke (Fig. 71, 72, 74) oder Hockin & Matthiessen (Fig. 70) gemessen werden. Die Messung durch Stromstärke und Spannungsverlust (Fig. 65) wird, weil dabei die Bürsten aufliegen müssen, wegen des an denselben auftretenden sehr veränderlichen Übergangswiderstandes zu ungenau. Die Widerstände von sämtlichen einfach geschlossenen Ankerwickelungen für Gleichstrom ohne Äquipotentialverbindungen werden am einfachsten durch Messung von zwei parallelen Hälften der Wickelung bestimmt.

Verwendbar ist für Ankerwiderstandsmessungen eigentlich nur die Thomsonsche Doppelbrücke. Man muß nämlich zwei Bürsten zur Stromzuführung auf den Kollektor auflegen und dann die Spannungsdrähte der Doppelbrücke an zwei bestimmte Lamellen des Kollektors anlegen. Je schneller man die Messung ausführen kann, um so genauer wird sie, weil gewöhnlich der Anker im warmen Zustand sofort nach dem Stillsetzen gemessen wird und bei lang-

dauernden Messungen seine Temperatur gerade auf der Oberfläche, wo die Wickelung liegt, sich ändert. Bei der Thomsonbrücke ist nur eine Einstellung nötig, bei der Hockin & Matthiessenschen Methode aber vier.

Je nach der Art der Wickelung liegen nun diejenigen schon erwähnten beiden Kollektorlamellen, auf die die Spannungsdrähte der Thomsonbrücke aufzulegen sind, entweder um die Hälfte oder um eine besonders zu bestimmende Anzahl der Kollektorlamellen voneinander entfernt. Es soll nun in folgendem die Zahl x, welche man zu einer beliebigen Lamelle hinzuzuzählen hat, um zu derjenigen Lamelle zu gelangen, welche mit der ersten die Wickelung in zwei gleiche Hälften teilt, bestimmt werden.

Für jede Wickelung ohne Äquipotentialverbindungen gilt die Regel: **Um diejenige Lamelle zu finden, welche mit einer beliebig gewählten die Ankerwickelung in zwei gleiche Hälften teilt, muß der Kollektorschritt so oft um den Kollektor herum zurückgelegt werden, als die halbe Zahl der Kollektorlamellen beträgt.**

In den nachstehenden Ableitungen gelten folgende Bezeichnungen (nach Arnold, Die Gleichstrommaschine, Verlag von J. Springer, Berlin):

a = halbe Zahl der parallelen Ankerstromzweige.
b = beliebig gewählte ganze Zahl, deren Summe oder Differenz mit s durch $2p$ teilbar sein muß.
K = Zahl der Kollektorlamellen.
s = Zahl der wirksamen Spulenseiten auf dem Ankerumfange
p = Zahl der Polpaare.
x = diejenige Zahl, welche man zu einer beliebigen Lamelle, von der man ausgeht, hinzuzählen muß, um diejenige Lamelle zu erhalten, die mit der ersten die Wickelung in zwei gleiche Hälften teilt.
m = Zahl der einzelnen Wickelungen bei mehrfach geschlossener Ankerwickelung.
$\left.\begin{matrix} y_1 \\ y_2 \end{matrix}\right\}$ = Teilschritte der Wickelung
y_k = Kollektorschritt.
y_p = Potentialschritt bei Äquipotentialverbindungen.
n = die Zahl, welche, mit der Kollektorlamellenzahl multipliziert, von $\frac{K}{2} \cdot y$ oder $\frac{K-1}{2} \cdot y_k$ abzuziehen ist, daß ein Rest bleibt kleiner als K.

Für jede Wickelung ohne Äquipotentialverbindungen gilt nach vorstehendem:

$$x = y_k \cdot \frac{K}{2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (26)$$

Ist K ungerade, dann geht die Formel über in:

$$x = y_k \cdot \frac{K-1}{2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (27)$$

Im letzteren Falle, wo die Zahl der Kollektorlamellen ungerade ist, wird die Wickelung nicht genau in zwei gleiche Hälften geteilt, weil auf der einen Seite immer eine Spule mehr vorhanden ist (siehe Fig. 103, wo die Hälfte der Wickelung dicker gezeichnet ist). Im allgemeinen ist aber die Gesamtzahl s der induzierten Spulenseiten ziemlich groß, bedeutend größer als in den gezeichneten schematischen Darstellungen, so daß immer der Widerstand der einen Spule mehr gegenüber der halben Gesamtzahl verschwindet, was aus folgender Überlegung hervorgeht:

Damit die Zahl der Stromschwankungen des erzeugten Gleichstromes nicht zu groß wird, muß eine bestimmte geringste Lamellenzahl überhaupt vorhanden sein. Nach Arnold sind für eine Schwankung des Gleichstromes von 1,1 % pro Polpaar 15 Lamellen nötig.

Es sei $p = 2$ und damit $K = 30$ als geringste Zahl gewählt; um ungerade Lamellenzahl zu erhalten, sei ausgeführt $K = 31$. In der einen Hälfte der Wickelung liegen nun 30 Spulenseiten, in der andern 32. Jede Spule möge nur aus einer Windung, also zwei induzierten Drähten bestehen. Jeder induzierte Draht habe einen Widerstand von $r \cdot \Omega$, dann wird der gesamte gemessene Widerstand:

$$\frac{30 \cdot r \cdot 32 \cdot r}{r\,(30 + 32)} = 15{,}48\, r.$$

Bei genauer Teilung würde aber die Hälfte der Wickelung $16\, r$ als Widerstand haben, der prozentuale Unterschied wird demnach:

$$\frac{0{,}52 \cdot 100}{16} = 3{,}25\,\%.$$

Da das Beispiel absichtlich sehr ungünstig gewählt wurde, ist der prozentuale Unterschied in Wirklichkeit immer viel kleiner und zu vernachlässigen.

Bei der Messung des Ankerwiderstandes in zwei Hälften wird ¼ des Widerstandes der gesamten Ankerelemente bei Hintereinanderschaltung gemessen. Es gilt deshalb zwischen gemessenem Widerstand und wirklichem Widerstand des Ankers im Betriebe:

Der gemessene Widerstand sei r_x; hat die Maschine $2\,a$ Anker-

stromkreise, so ist der wirkliche Widerstand des Ankers bei einfach geschlossener Wickelung im Betriebe:

$$r_a \cdot \frac{r_x \cdot 4}{(2\,a)^2} = \frac{r_x}{a^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

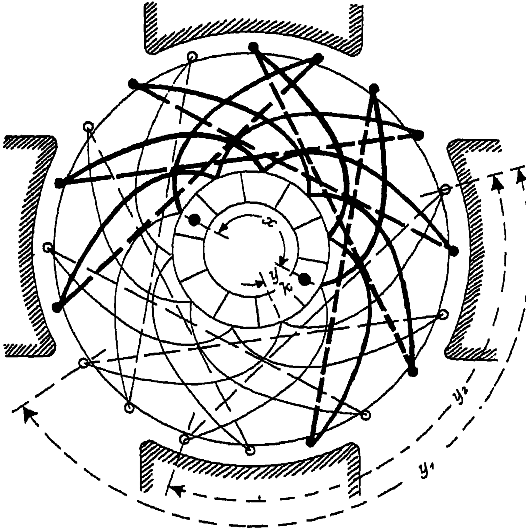


Fig. 102. Schleifenwickelung mit gerader Lamellenzahl.

Für mehrfach geschlossene Wickelungen ändert sich Formel (28) um in:

$$r_a = \frac{m \cdot r_x \cdot 4}{(2\,a)^2} = \frac{m \cdot r_x}{a^2} \; .$$

(vgl. S. 106).

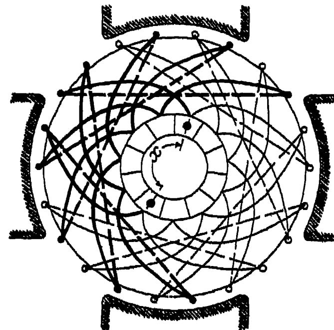


Fig. 103. Schleifenwickelung mit ungerader Lamellenzahl.

Es sind nunmehr die Werte von x für die verschiedenen Ankerwickelungsarten ohne Äquipotentialverbindungen zu bestimmen, es sollen aber nur die Trommelwickelungen behandelt werden.

Für Schleifen- oder Parallelwickelung (Fig. 102 und 103) gilt nach Arnold:

$$y_1 = \frac{s \pm b}{2p} \pm \frac{2a}{p},$$

$$y_2 = \frac{s \pm b}{2p},$$

$$y_k = \frac{y_1 - y_2}{2} = \pm \frac{a}{p} = \pm 1.$$

In sämtlichen Wickelungen gilt nun für gerade Werte von K die Gleichung:

$$x = \frac{K}{2} \cdot y_k - n \cdot K \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (29)$$

Ist K ungerade, so gilt:

$$x = \frac{K-1}{2} \cdot y_k - n \cdot K \quad . \; . \; . \; . \quad (30)$$

Nach Formel (26) und (27) würde man mehrere Male um den Kollektor herumzählen müssen; man kann daher die gesamte Kollektorlamellenzahl so oft (n mal) abziehen, daß ein Rest bleibt kleiner als K (nach A. Wettler, Messung des Ankerwiderstandes, ETZ 1902, S. 8).

Es ergibt sich weiter für K gerade:

$$n = \frac{\frac{K}{2} \cdot y_k}{K} = \frac{y_k - 1}{2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (31)$$

denn es muß n eine ganze Zahl sein, und nach Arnold müssen für eine einfach geschlossene Wickelung K und y_k teilerfremd sein, also wenn K gerade ist, ist y_k ungerade. Aus Formel (31) für K gerade folgt weiter für Formel (33):

$$x = \frac{K}{2} \cdot y_k - \frac{(y_k - 1) \cdot K}{2} = \frac{K}{2} \cdot (y_k - y_k + 1) = \frac{K}{2}.$$

Das heißt:

Bei gerader Lamellenzahl liegen die beiden Lamellen, welche die Wickelung in zwei Hälften teilen, immer um die Hälfte der gesamten Lamellen voneinander entfernt, also auf demselben Durchmesser einander gegenüber.

Für mehrfach geschlossene Wickelungen müssen $\frac{K}{m}$ und y_k, teilerfremd sein, wenn m die Zahl der einzelnen Wickelungen bedeutet.

Bei ungeraden Werten von K ergibt sich der Wert:

$$n = \frac{\frac{K-1}{2} \cdot y_k}{K} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

wobei für n, falls die Division nicht aufgeht, die ganze Zahl zu nehmen ist, also die Dezimalen hinter dem Komma zu streichen sind.

Ein Beispiel möge dies erläutern:

In Fig. 105 ist $K = 11$, $y_k = 8$,

folglich $$n = \frac{\frac{11-1}{2} \cdot 8}{11} = \frac{40}{11} = 3{,}63,$$

also gilt $$n = 3.$$

Die Formeln (29) und (30) mit (31) und (32) lassen sich für jede Wickelung sinngemäß anwenden.

Nach Arnold gilt, wie schon erwähnt, für Schleifen- oder Parallelwickelung (Fig. 102 und 103):

$$y_k = \pm 1.$$

Für diesen Fall wird Formel (31):

$$n = \frac{y_k - 1}{2} = \frac{1-1}{2} = 0,$$

also allgemein:

$$x = \frac{K}{2} \cdot y_k = \frac{K}{2} \text{ für } K \text{ gerade}$$

und $x = \frac{K-1}{2} \cdot y_k = \frac{K-1}{2}$ für K ungerade.

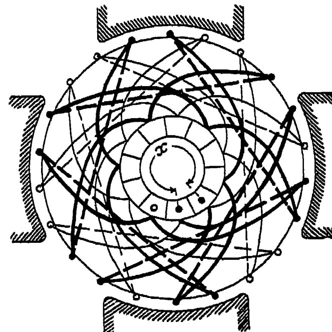


Fig. 104. Schleifenwickelung mit einer übersprungenen Lamelle.

Man kann nun aber bei der Schleifenwickelung immer ein oder mehrere Elemente überspringen. Fig. 104 zeigt eine Wickelung, wobei immer eine Kollektorlamelle und ein Wickelungselement übersprungen ist. In diesem Falle ist $y_k > 1$ und es gelten die Formeln (29), (30), (31) und (32) je nachdem, ob K gerade oder ungerade ist.

Einige Zahlenbeispiele an Hand der Fig. 102, 103 und 104 mögen die gegebenen Ableitungen noch genauer erläutern.

In Fig. 102 ist $K = 10$, $y_k = 1$, also $x = 5$.

Es kann x links oder rechts herum gezählt werden, das ist bei allen Wickelungen gleichgültig, wie an der betreffenden Stelle jedesmal gezeigt werden soll.

In Fig. 103 ist $K = 11$, $y_k = 1$, also ebenfalls $x = 5$.

In beiden Figuren ist die Hälfte der Wickelung dick gezeichnet und die beiden zusammengehörigen Kollektorlamellen sind mit schwarzen Kreisen bezeichnet. Beim Zählen nach rechts herum gelangt man in Fig. 103 auf die neben der bezeichneten befindliche Lamelle; das Meßergebnis ist dort natürlich dasselbe als auf der nebenliegenden, mit schwarzem Kreis versehenen Lamelle, andern Falles darf aus den 2 Messungen das Mittel genommen werden.

In Fig. 104 ist $K = 11$, $y_k = 2$. Nach Formel (32) wird:

$$n = \frac{\frac{K-1}{2} \cdot y_k}{K} = \frac{\frac{11-1}{2} \cdot 2}{11} = 0.$$

Folglich nach Formel (30):

$$x = \frac{K-1}{2} \cdot y_k - n \cdot K = \frac{11-1}{2} \cdot 2 - 0 = 10.$$

Bei Wellenwickelung ist zu unterscheiden zwischen einfacher Reihenschaltung (Fig. 105) und Reihenparallelschaltung (Fig. 106).

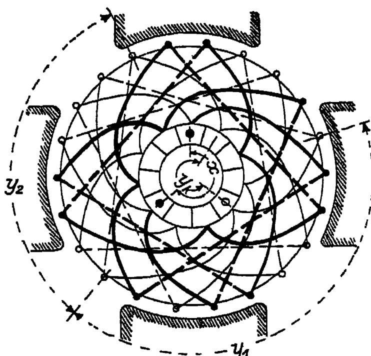


Fig. 105. Wellenwickelung mit einfacher Reihenschaltung.

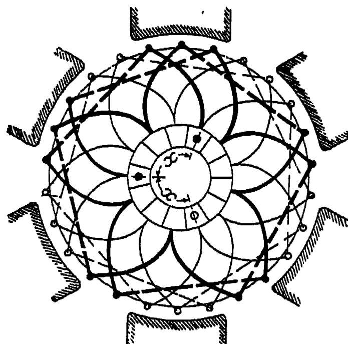


Fig. 106. Wellenwickelung mit Reihenschaltung.

Bei **Wellenwickelung mit einfacher Reihenschaltung** sind von Arnold die Formeln aufgestellt:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{s \pm 2}{p},$$

$$y_k = \frac{K + 1}{p},$$

$$K = \frac{s}{2}.$$

In Fig. 105 ist $K = 11$, $y_k = 8$; die Anwendung der Formeln (30) und (32) ergibt:

$$n = \frac{\frac{K-1}{2} \cdot y_k}{K} = \frac{\frac{11-1}{2} \cdot 8}{11} = 3{,}63 = 3,$$

woraus nach Formel (30) folgt:

$$x = \frac{K-1}{2} \cdot y_k - n \cdot K = \frac{11-1}{2} \cdot 8 - 3 \cdot 11 = 7.$$

Schreitet man in Fig. 105 von der oberen, mit schwarzem Kreis gezeichneten Lamelle rechts herum um 7 Lamellen weiter, dann ist die zugehörige Lamelle ebenfalls mit schwarzem Kreis bezeichnet. Schreitet man nach links herum, so gelangt man zu der mit weißem Kreis gezeichneten Lamelle; die Messung ergibt auf beiden Lamellen denselben Wert, anderen Falles darf das Mittel genommen werden.

In Fig. 106 ist eine **Wellenwickelung mit Reihenparallelschaltung**, und zwar vier parallele Stromkreise, also $a = 2$ gezeichnet bei sechs Polen.

Für diese Wickelungsart gilt nach Arnold:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{s \pm 2 \cdot a}{p},$$

$$y_k = \frac{K \pm a}{p}.$$

In Fig. 106 ist $a = 2$, $K = 13$, $p = 3$, $y_k = 5$.

Nach Formel (32) ergibt sich:

$$n = \frac{\frac{K-1}{2} \cdot y_k}{K} = \frac{\frac{13-1}{2} \cdot 5}{13} = \frac{30}{13} = 2{,}30 = 2.$$

Nach Formel (30) wird

$$x = \frac{K-1}{2} \cdot y_k - n \cdot K = \frac{13-1}{2} \cdot 5 - 2 \cdot 13 = 4.$$

Auch in Fig. 106 sind beide Lamellen von der ersten Lamelle aus bezeichnet; zählt man rechts herum, so gelangt man zu der mit schwarzem Kreis, links herum zu der mit weißem Kreis.

Jede Wickelung kann auch **mehrfach geschlossen** sein. Dieser Fall tritt dann ein, wenn K und y_k einen gemeinschaftlichen Teiler haben, und zwar ist nach Arnold die Zahl der Schließungen gleich dem gemeinschaftlichen Teiler von K und y_k.

In Fig. 107 ist z. B. $K = 15$, $y_k = 6$. Der gemeinschaftliche Teiler von K und y_k beträgt 3. Es sind also in diesem Falle drei geschlossene Wickelungen vorhanden, welche in der Zeichnung auch einzeln hervorgehoben sind.

Hier läßt sich ebenfalls Formel (32) anwenden; es ergibt sich:

$$n = \frac{\frac{K-1}{2} \cdot yk}{K} = \frac{\frac{15-1}{2} \cdot 6}{15} = 2, \dots = 2$$

und weiter aus Formel (30):

$$x = \frac{K-1}{2} \cdot yk - n \cdot K = \frac{15-1}{2} \cdot 6 - 2 \cdot 15 = 12.$$

Wie aus Fig. 107 hervorgeht, wird nur eine der drei Wickelungen gemessen; um die beiden anderen Wickelungen ebenfalls zu messen, muß man die Zuführungsdrähte der Thomson-Brücke jedesmal um eine Lamelle nach links oder rechts verschieben.

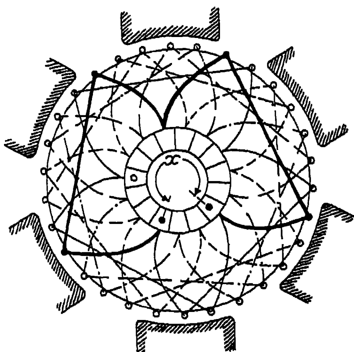


Fig. 107. Mehrfach geschlossene Wickelung.

Bei den mehrfach geschlossenen Wickelungen kann auch Formel (28) nicht ohne weiteres angewendet werden. Sie muß lauten:

$$r_a = \frac{m \cdot r_x \cdot 4}{(2\,a)^2} = \frac{m \cdot r_x}{a^2},$$

wobei m die Zahl der Wickelungen ist.

Der leichteren Übersichtlichkeit wegen sind in der nachstehenden Tabelle III die bei der Widerstandsmessung von Gleichstromankern auszuführenden Anschlüsse für die Meßdrähte der Doppelbrücke noch einmal zusammengestellt.

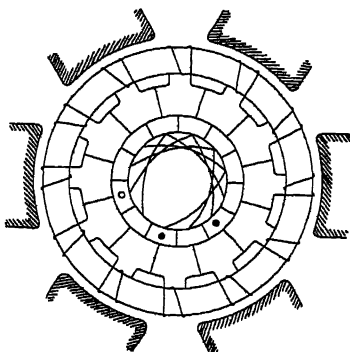


Fig. 108. Ringanker mit Mordeyschaltung.

Bei Ankern, deren **Wickelung Äquipotentialverbindungen** besitzt, ist die Widerstandsmessung in zwei parallelen Hälften nicht mehr möglich. Man kann aber auch hier die Spannungsdrähte der Thomson-Brücke an zwei bestimmten Punkten auflegen, welche aber nicht nach den früheren Ableitungen gefunden werden können.

Tabelle III.

Werte von x für Trommelwickelungen (ohne Äquipotentialverbindungen).

Art der Wickelung	Zahl der Kollektorlamellen K	a	x	n	Bemerkungen
Schleifenwickelung . . .	gerade Zahl	$\gtreqless 1$	$x = \frac{K}{2}$	0	Wenn in den für n angegebenen Formeln die Division nicht aufgeht, ist für n die ganze Zahl des Dezimalbruches zu nehmen
Wellenwickelung einfach geschlossen	gerade Zahl				
Wellenwickelung mehrfach geschlossen	gerade Zahl				
Schleifenwickelung . . .	ungerade	$\gtreqless 1$	$x = \frac{K-1}{2}$	0	$y_k = 1$
Schleifenwickelung . . .	ungerade	$\gtreqless 1$	$x = \frac{K-1}{2} \cdot y_k - n \cdot K$	$n = \frac{\frac{K-1}{2} \cdot y_k}{K}$	$y_k > 1$
Wellenwickelung einfach geschlossen	ungerade	$\gtreqless 1$	$x = \frac{K-1}{2} \cdot y_k - n \cdot K$	$n = \frac{\frac{K-1}{2} \cdot y_k}{K}$	
Wellenwickelung mehrfach geschlossen	ungerade	$\gtreqless 1$	$x = \frac{K-1}{2} \cdot y_k - n \cdot K$	$n = \frac{\frac{K-1}{2} \cdot y_k}{K}$	

Die ältesten Äquipotentialverbindungen wurden von Mordey angegeben für Ringanker mit Spiralwickelung, um die Zahl der Stromabnehmestellen auf dem Kollektor auf zwei zu vermindern, ohne Rücksicht auf die Polzahl der Maschine. In Fig. 108 ist eine Mordey-Schaltung gezeichnet. Es sind immer solche Lamellen miteinander verbunden, welche dasselbe Potential haben. Die Entfernung solcher zusammengehörigen Lamellen wird mit Potentialschritt y bezeichnet.

Bei **Trommelankern** mit **Schleifenwickelung** sind nur dann Äquipotentialverbindungen möglich, wenn $\frac{K}{p}$ eine ganze Zahl ist.

Bei diesen Wickelungen liegen die Lamellen, auf welche die Meßdrähte der Doppelbrücke zu führen sind, um $\frac{y_p}{2}$ voneinander entfernt, wenn y_p gerade ist, und um $\frac{y_p - 1}{2}$, wenn y_p ungerade ist. Dabei ist $y_p = \frac{K}{p}$.

Die Meßdrähte können auch auf solche Lamellen gelegt werden, welche nur das 3fache, 5fache, 7fache usw. (immer ungerade Zahlen) voneinander entfernt sind.

Bei Ankern mit **Wellenwickelung** sind nur dann Äquipotentialverbindungen möglich, wenn $a > 1$ ist. In Fig. 109 ist eine Wickelung gezeichnet mit $a = 3$, $p = 6$, $K = 63$. Entsprechend dem Wert $a = 3$ sind 6 Stromabnehmestellen vorhanden, welche nach Arnold bei Reihenparallelwickelung auf zwei vermindert werden können, wenn die beiden Bürsten a Lamellen gleichzeitig bedecken, weil immer die beiden neben der normalen Lamelle gelegenen Lamellen nur durch eine Spule mit der Bürste gleicher Polarität verbunden sind, und der Widerstand der einen Spule gegenüber dem Gesamtwiderstand des Ankers klein ist.

In Fig. 109 sind z. B. die Lamellen neben derjenigen, auf welcher die Bürste B_1 liegt, durch die dicker gezeichneten Spulen mit den gleichpoligen Bürsten B_3 und B_5 verbunden. Bei der Messung des Ankerwiderstandes schließt man nur die Spannungsdrähte an zwei Stromabnehmerstellen von verschiedener Polarität an, indem man jeden Spannungsdraht gleichzeitig mit a Lamellen verbindet.

Die Stromabnehmestellen von ungleicher Polarität sind immer um $\frac{K}{2p}$ Lamellen voneinander entfernt oder um ein ungerades Vielfaches von $\frac{K}{2p}$,

$$\text{also } \frac{K}{2p} \cdot 3 \text{ oder } \frac{K}{2p} \cdot 5 \text{ usw.}$$

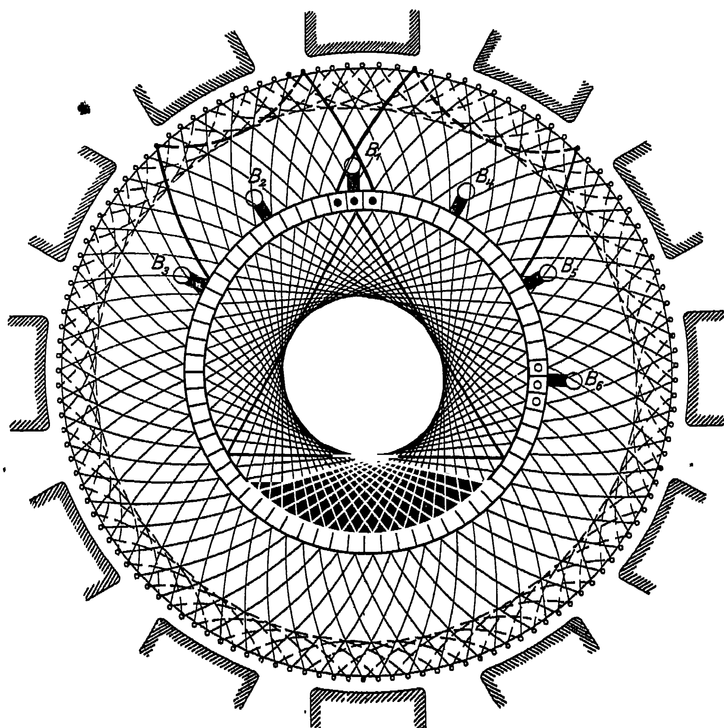


Fig. 109. Wellenwickelung mit Äquipotentialverbindungen nach Arnold.

In Fig. 109 ist $K = 63$, $p = 6$, $a = 3$. Infolgedessen sind $2a = 6$ Stromabnahmestellen mit den Bürsten B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 und B_6 vorhanden, welche voneinander um $2p = 5{,}25$ Lamellen voneinander entfernt sind.

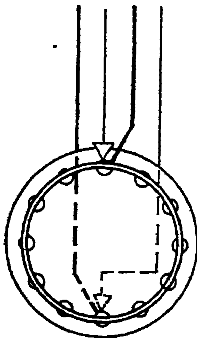
Als Anschlußstellen sind die Bürsten B_1 und B_6 ausgewählt, deren Abstand $\frac{K}{2p} \cdot 3 = 15{,}75$ Lamellen beträgt. Auf jeden dieser beiden Bürstenstifte sind zur Stromzuführung während der Messung drei Bürsten aus Kupfer aufzusetzen, welche die drei nebeneinander liegenden Lamellen gleichmäßig bedecken. Außerdem müssen aber, wie schon erwähnt, die beiden Spannungsdrähte der Doppelbrücke ebenfalls jede dieser drei Lamellen gleichzeitig berühren. Die übrigen Bürsten sind bei der Messung sämtlich abzuheben.

Bei allen Wickelungen mit Äquipotentialverbindungen ist der gemessene Widerstand gleich dem Ankerwiderstand der betriebsfertigen Maschine.

Es ist also der gemessene Wert nicht umzurechnen wie in Formel (28) angegeben.

Ein- und mehrphasige Wechselstrommaschinen haben ebenfalls immer sehr kleine Ankerwiderstände, so daß auch hier die Methoden nach den Fig. 65, 70 und 71, namentlich aber 71 in Frage kommen.

Bei mehrphasigen Maschinen mit Sternschaltung geschieht die Messung nach Fig. 96 *II* und die Berechnung nach S. 96, bei Dreiecksschaltung sind die Verbindungen der drei Phasen zu öffnen und die Messung ist nach Fig. 96 *I* auszuführen mit der Berechnung nach S. 95.


Fig. 110. Anschluß der Meßdrähte bei Kurzschlußankern.

Die Widerstandsmessung von **Kurzschlußankern**, wie sie bei kleinen Drehfeldmotoren angewendet werden, geschieht nach Fig. 110. Die Kurzschlußläufer sind immer so ausgeführt, daß die Kupferleiter in Löchern dicht am Läuferumfange liegen. Die auf beiden Stirnseiten vorstehenden Enden der Kupferstäbe sind durch Ringe kurz geschlossen. Es sind nun die Strom- und Meßdrähte der Thomson-Brücke so zuzuführen, daß die Stromverteilung möglichst gleichmäßig wird. Man schließt also je eine Meßleitung und eine Zuführung an jeden der beiden Ringe für sich an und so, daß diese Anschlußpunkte auf beiden Ringen auf dem Durchmesser sich gegenüberliegen, wie Fig. 110 zeigt. Bei einer geraden Zahl

von Stäben fallen dann beide Anschlüsse auf zwei einander gegenüberliegende Stäbe, bei ungerader Stabzahl fällt der eine Anschluß zwischen zwei Stäbe.

Beträgt der gemessene Widerstand des Kurzschlußankers r_x und die Polzahl des Motors P, dann ist der dem Betriebszustand entsprechende Widerstand des Kurzschlußankers:

$$r_a = \frac{r_x}{P},$$

weil r_x der Widerstand sämtlicher Stäbe in Parallelschaltung ist, und im Betriebe so viel parallel geschaltete Stromkreise im Läufer entstehen, als der Ständer Pole hat.

Sechster Abschnitt.

Magnetische Messungen, Feldverteilung und Bestimmung der Wellenform von Wechselströmen.

Magnetisierungskurve und Leerlaufscharakteristik.

Die Leerlaufscharakteristik wird, wie der Name andeutet, an der leerlaufenden Maschine aufgenommen. Die Schaltung dazu zeigt Fig. 111. In dieser Figur ist eine Gleichstrommaschine gezeichnet, die Schaltung zur Aufnahme der Leerlaufscharakteristik ist aber bei allen Maschinengattungen die gleiche. Die Magnetwickelung wird durch eine fremde Stromquelle erregt und die Maschine mit der normalen Umlaufszahl angetrieben. Die Pole des Ankers werden durch ein Voltmeter V verbunden, und darauf der Zusammenhang zwischen Magnetisierungsstrom i und der im Anker induzierten elektromotorischen Kraft E durch gleichzeitige Messung beider bei konstanter Umdrehungszahl der Maschine festgestellt.

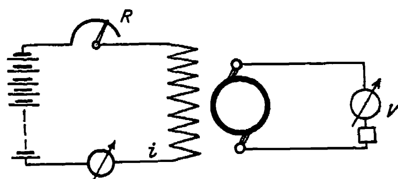


Fig. 111. Aufnahme der Leerlaufscharakteristik mit fremder Erregung.

In Fig. 112 ist die Leerlaufscharakteristik einer kleinen Gleichstrommaschine gezeichnet. Wie aus dieser Figur zu erkennen ist,

erhält man bei einer Aufnahme mit zunehmendem Magnetisierungsstrom i eine tieferliegende Kurve, als wenn man, mit dem höchsten Wert von i beginnend, mit abnehmender Erregung arbeitet. Dieser Umstand liegt in der Eigenschaft des Eisens, die man Hysteresis nennt, vermöge deren das Eisen je nach seiner Art mehr oder weniger Magnetismus behält, wenn es einmal magnetisiert worden ist. Es beginnt deshalb auch die Leerlaufscharakteristik nicht im Nullpunkt, sondern dem sogenannten geringen remanenten Magnetismus entsprechend etwas höher. Bei der Aufnahme der Leerlaufscharakteristik ist wegen der eben angeführten Eigenschaft des Eisens darauf zu achten, daß der Magnetisierungsstrom stets in gleicher Weise, also entweder nur zunehmend oder nur abnehmend geändert wird, im anderen Fall würden die beobachteten Punkte bald auf der aufsteigenden, bald auf der absteigenden Kurve liegen und keine Kurve ergeben.

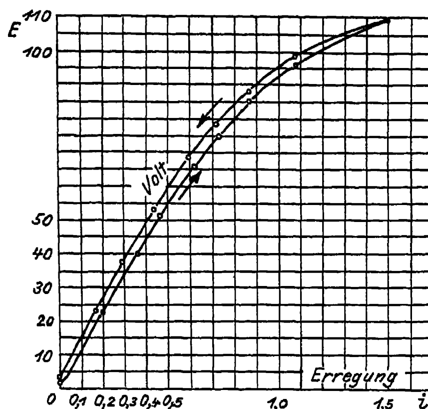


Fig. 112. Leerlaufscharakteristik.

Die Magnetisierungskurve geht aus der Leerlaufscharakteristik hervor, wenn nur die Abszisse i mit der Windungszahl eines Magnetschenkels multipliziert und die Ordinate mit

$$\frac{60 \cdot 10^8 \cdot a}{n \cdot U \cdot p}$$

multipliziert, wobei U die Zahl sämtlicher induzierten Drähte auf dem Anker bedeutet und n die minutliche Umlaufszahl. Die übrigen Zeichen bedeuten dasselbe wie auf S. 99 angegeben. Man erhält dann als Abszisse Amperewindungen für einen Schenkel und als Ordinate die Kraftlinienzahl für einen Pol.

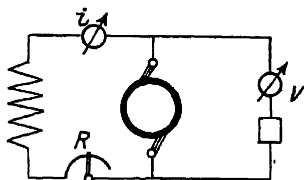


Fig. 113. Aufnahme der Leerlaufscharakteristik einer Nebenschlußmaschine mit eigener Erregung.

Bei Nebenschlußmaschinen hat man im allgemeinen keine fremde Erregung nötig. Man kann die Maschinen nach Fig. 113 mit Selbsterregung laufen lassen, wobei der zur Magnetisierung notwendige Strom i vom Anker geliefert wird; es ist dies besonders bei größeren Maschinen zulässig, weil der gewöhnlich nur 3 % vom Gesamtstrom betragende Magnetisierungsstrom weder im Anker einen nennenswerten Spannungsverlust hervorruft, noch auf das Feld der Pole rückwirken kann.

Häufig ist es auch nicht oder nur schwer möglich, die normale Umlaufszahl der Maschine zu erreichen; das ist aber auch nicht nötig, weil die im Anker induzierte elektromotorische Kraft bei konstantem Felde proportional der Umlaufszahl ist. Bezeichnet n die normale, n_x die Umlaufszahl, bei welcher eine elektromotorische Kraft E_x gemessen wurde, dann ist die zur normalen Umlaufszahl n gehörige elektromotorische Kraft

$$E = E_x \cdot \frac{n}{n_x} \quad \text{. . . . . (34)}$$

Bei fremder Erregung kann daher sogar die Umlaufszahl während der Messung verschieden sein, bei Nebenschlußmaschinen mit Selbsterregung (Fig. 113) muß sie allerdings konstant bleiben, damit der Magnetstrom i sich nur in gleichem Sinne ändert.

Streuung und Streuungskoeffizienten.

Unter Streuungskoeffizient versteht man das Verhältnis der in einem bestimmten Teile eines magnetischen Kreises vorhandenen Kraftlinien zu den gesamten, durch die magnetisierenden Amperewindungen erzeugten Kraftlinien.

Sind z. B. in den Schenkeln einer Maschine Φ_s Kraftlinien erzeugt und gehen durch irgend einen anderen Teil der Maschine Φ_x Kraftlinien, dann ist der Streuungskoeffizient dieses Teiles:

$$\sigma = \frac{\Phi_x}{\Phi_s} \quad \text{. . . . . (35)}$$

Der Streuungskoeffizient muß also kleiner als 1 sein, weil der in den Schenkeln erzeugte Betrag Φ_s stets der größere ist.

Die Bestimmung des Streuungskoeffizienten für die verschiedenen Teile einer Maschine geschieht durch Vergleichung der in ihnen vorhandenen Kraftlinien mit den in den Schenkeln erzeugten Gesamtkraftlinien nach Fig. 114. Bestimmt man durch

eine Prüfspule nach einer der folgenden Methoden zunächst Φ_s, darauf Φ_a, dann ist $\sigma = \frac{\Phi_a}{\Phi_s}$ der Streuungskoeffizient des Ankers, oder wenn Φ_j die Kraftlinienzahl des Joches ist, dann bezeichnet $\sigma_j = \frac{\Phi_j}{\Phi_s}$ den Streuungskoeffizienten des Joches.

Die Bestimmung der Kraftlinienzahlen Φ_s, Φ_a, Φ_j usw. geschieht dadurch, daß die in einer Prüfungsspule durch plötzliche Änderung der Kraftlinien entstehende Induktion gemessen wird. Der Streuungskoeffizient ist nicht konstant, sondern nimmt mit der

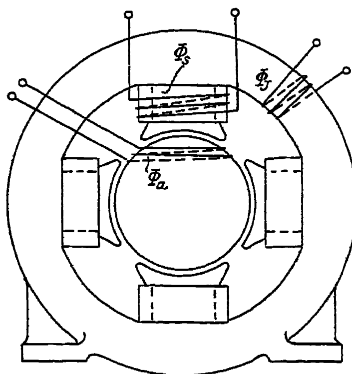


Fig. 114. Messung der Streuung.

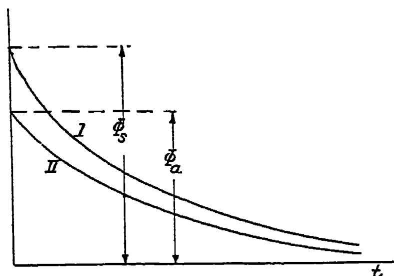
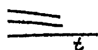


Fig. 115. Änderung des Kraftflusses beim Verschwinden desselben.

Sättigung im Eisen zu; um daher einen normalen Wert zu erhalten, darf man die Kraftlinien nicht vollständig zum Verschwinden bringen, sondern dieselben nur um einen bestimmten Betrag ändern. In Fig. 115 sind zwei Kurven dargestellt, welche die Änderung der Kraftlinien mit der Zeit darstellen. Kurve *I* stellt das Verschwinden des größeren Kraftfußes Φ_s dar, Kurve *II* das des kleineren Φ_a beim Ausschalten des Magnetisierungsstromes. Für beide Kurven gilt die Gleichung von Helmholtz:

$$i = i_1 \cdot \varepsilon^{-\frac{R}{L} \cdot t},$$

wobei i_1 die Stromstärke bedeutet, welche die Kraftlinienzahl erzeugt hat, sie wird geändert auf den Wert i; ε ist die Basis der natürlichen Logarithmen, R der Widerstand, L der Selbstinduk-



tionskoeffizient des Stromkreises, t die Zeit. Man muß, wie aus d Helmholtzschen Gleichung hervorgeht, für t bei der Bestimmu von Φ_s und Φ_a beide Male denselben Wert nehmen, denn in d erwähnten Gleichung ist L die einzige Größe, welche von der Kra flußstärke abhängt und für $i = 0$ würde $t = \infty$ werden.

Nach Ölschläger verfährt man aber schon genügend gena wenn man den Magnetisierungsstrom von i_1 nicht auf Null, sonde jedesmal nur um einen bestimmten kleinen Betrag ändert. Die Maßregel ist unbedingt erforderlich, sowohl bei den ballistisch als auch bei der später beschriebenen Nullmethode zur Bestimmu der Streuung.

Es ist nicht gleichgültig, an welcher Stelle des Joches, d Ankers oder der Schenkel die Meßspulen für die Bestimmung d Kraftflußverhältnisse liegen. In Fig. 116 ist ein Bild der Streuu

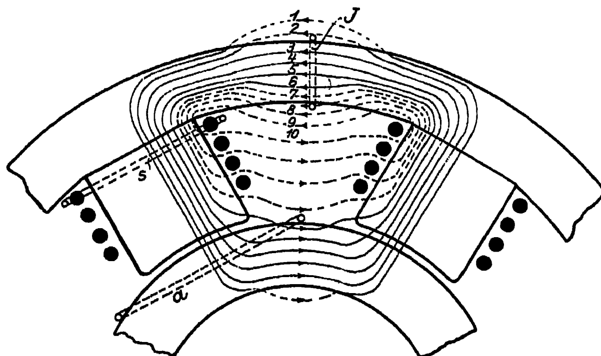


Fig. 116. Streubild für einen Kraftflußkreis.

für einen Kraftflußkreis gezeichnet. Die punktierten Linien si Streulinien. Die ausgezogenen Linien sind nützliche Kraftlinie welche aber teilweise auch streuen können, wie die Linien *1* und Die Linien *7*, *8*, *9*, *10* dagegen schließen sich, ohne in den Ank eingetreten zu sein, sie sind daher reine Streulinien. Da die Wi dungen auf den Schenkeln die gesamten Kraftlinien erzeugen, muß auch jede einzelne Kraftlinie wenigstens eine der Schenk windungen umfassen, das Bild der Streuung wird also im wesen lichen mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

Es ergibt sich aus Fig. 116, daß die Meßspule S für die Schenk möglichst weit oben, nach dem Joch zu, umgelegt werden mu

damit alle in den Schenkeln erzeugten Kraftlinien durch sie hindurchgehen. Für den Anker muß die Lage der Meßspule a so sein, daß sie genau in der Mitte zwischen je zwei Polen aufgelegt wird, ihre Breite muß also gleich der Polteilung sein. Die Kraftlinien, welche durch das Joch verlaufen, lassen sich nicht ganz genau bestimmen, wenn die Meßspule J in der Mitte des Joches liegt, wie Fig. 116 zeigt, denn die Kraftlinien 1 und 2, welche nach außen streuen, induzieren bei ihrem Verschwinden sowohl die äußeren als die inneren Windungen der Prüfspule, heben sich also gegenseitig auf.

Es ist jedoch für die Beurteilung der Maschine der Streuungskoeffizient des Ankers immer der wesentlichere und dieser läßt sich genau bestimmen.

Sodann ist noch zu erwähnen, daß man immer den Magnetisierungsstrom in allen Schenkelspulen gleichzeitig ändern muß und nicht wie in den nachstehenden Figuren nur schematisch angegeben, einen Schenkel allein zur Änderung des Kraftflusses benutzt. Es verlaufen durch jeden Schenkel zwei Kraftflußkreise und ändert man nur den Strom in einem Schenkel, so würden die benachbarten Kraftflußkreise Störungen und Verschiebungen hervorrufen und die Verteilung des Kraftflusses derartig ändern, daß sie nicht mehr derjenigen in der arbeitenden Maschine entsprechen würde.

Die Änderung des Magnetisierungsstromes muß plötzlich erfolgen; man darf dabei also nicht ganz ausschalten, wie schon erwähnt wurde, sondern darf nur um so viel die Sättigung ändern, daß die Änderung auf der Kurve (Fig. 115) als gerade Linie aufgefaßt werden kann. Ist z. B. der Magnetisierungsstrom 10 Ampere, dann ändert man ihn plötzlich auf 9 und beobachtet den dabei auftretenden Ausschlag.

In Fig. 117 ist eine **Schaltung zur Bestimmung der Streuung auf ballistischem Wege** gegeben. G ist das ballistische, also ungedämpft schwingende Spiegelgalvanometer, dessen Ablesung durch Fernrohr und Skala S erfolgt. N_1 ist eine Eichspule zur Bestimmung der Konstanten des Galvanometers, N_2 eine kleine Prüfspule, welche nur aus sehr feinen Windungen besteht und sehr kurz ist, im Vergleich zur Spule N_1. Die Wickellänge l der Spule N_1 muß wenigstens 10 mal so groß sein als ihr Durchmesser d, dann ist in ihrer Mitte, wo die Spule N_2 aufgeschoben ist, ein Feld von der Stärke:

$$H_0 = \frac{0{,}4\,\pi \cdot n_1 \,.\, i_0}{l},$$

dabei ist i_0 der Strom in Ampere, l die Wickellänge in Zentimetern, n_1 die Windungszahl von N_1.

Schaltet man plötzlich i_0 aus (hier darf man ganz ausschalten, weil die Spule N_1 kein Eisen enthält), dann wird die Spule N_2 durch

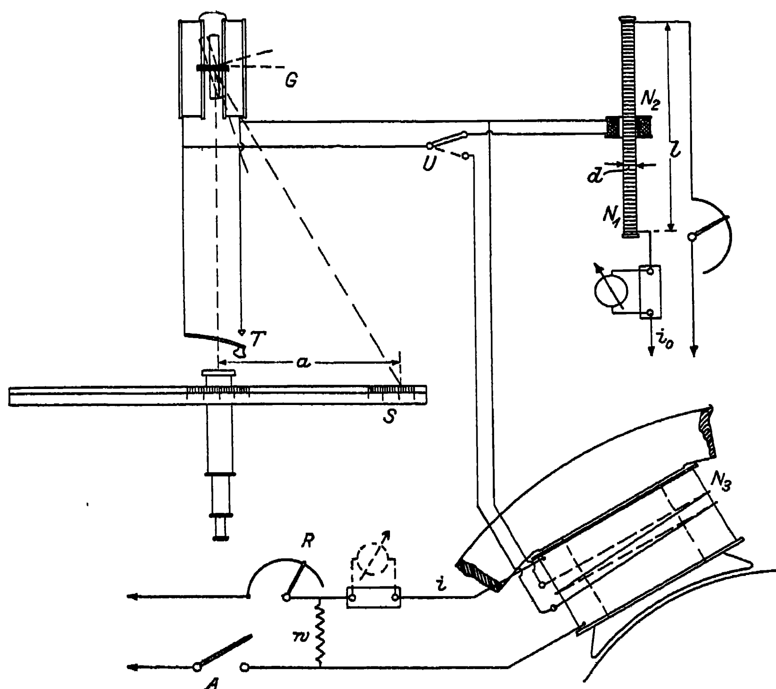


Fig. 117. Bestimmung der Streuung mit ballistischem Galvanometer.

den verschwindenden Kraftfluß induziert, welchen die Spule N_1 besaß. Dieser ist:

$$\Phi_0 = H_0 \cdot q,$$

dabei ist $q = \frac{d^2 \cdot \pi}{2}$ der Querschnitt der Spule N_1 und d ihr Durchmesser in Zentimetern.

Der durch das Verschwinden des Kraftflusses Φ_0 in dem Kreis der Spule N_2 entstehende Stromstoß verursacht einen Ausschlag a_0,

welcher mit dem Fernrohr abgelesen wird. Nach diesem Ausschlag würde das ungedämpfte Galvanometer noch eine ganze Anzahl Hin- und Herschwingungen ausführen, ehe es wieder zum Stillstand kommen würde. Man dämpft es deshalb sofort, nachdem man den ersten Ausschlag a_0 beobachtet hat, durch Niederdrücken des Tasters T. Hierdurch schließt man die Windungen des Galvanometers kurz und es entstehen durch die Schwingungen des Magneten Ströme in den Windungen, welche die Schwingungsenergie des Magneten schnell verzehren.

Darauf legt man den Umschalter U um und verbindet die Prüfspule N_3 auf dem Magnetschenkel der Maschine mit dem Galvanometer. Durch plötzliches Ausschalten von i wird die Spule N_3 induziert und der dabei erfolgende Ausschlag a_1 im Fernrohr beobachtet. Die Stärke des Kraftflusses in dem Magnetschenkel ergibt sich dann aus der Gleichung:

$$\Phi_s = \frac{\Phi_0 \cdot a_1}{a_0} \cdot \frac{N_2}{N_3};$$

Die Bestimmung des gesamten magnetischen Kraftflusses in den Schenkeln ist aber auf diese Weise nur möglich bei kleinen Maschinen. Bei größeren Maschinen ist das plötzliche Ausschalten des Magnetstromes gefährlich für die Isolierung der Spulen, weil beim plötzlichen Verschwinden des Kraftflusses sehr hohe Spannungen in der Magnetwickelung induziert werden können. Man muß daher stets einen Widerstand w parallel zu der Magnetwickelung schalten, der nur zum Ausgleich für die durch das Verschwinden des Kraftflusses entstehende Selbstinduktion dient und die Isolation vor dem Durchschlagen schützt.

Das vollständige Ausschalten ist zur Bestimmung des Streuungskoeffizienten aber überhaupt nicht nötig und, wie schon erklärt, auch nicht zulässig. Will man nur das σ, also nur den Streuungskoeffizienten bestimmen, so genügt ein Vergleich der Ausschläge. Es ist dann auch die Spule N_1 mit N_2 überflüssig.

Beobachtet man z. B. an einem ballistischen Galvanometer nach Fig. 117 beim Ändern des Magnetstromes um einen kleinen Betrag mit der Prüfspule s in Fig. 116 einen Ausschlag a_s, darauf mit der Prüfspule a bei derselben Änderung des Magnetstromes wie vorhin einen Ausschlag a_a, dann ist der Streuungskoeffizient des Ankers:

$$\sigma_a = \frac{a_a}{a_s}.$$

Das ballistische Galvanometer ist aber wegen seiner umständlichen Aufstellungsart und Behandlung bei Maschinenuntersuchungen etwas unbequem. Es empfiehlt sich für schnelle Messungen die **Nullmethode** von Goldschmidt (ETZ 1902 Heft 15). In Fig. 118 ist diese Methode gezeichnet. Soll durch das Gleichstrommillivoltmeter V kein Strom hindurchgehen, dann müssen sich die Spannungen in den gegeneinander geschalteten Prüfspulen gegenseitig aufheben. Die induzierten Spannungen sind proportional Kraftfluß mal Windungen.

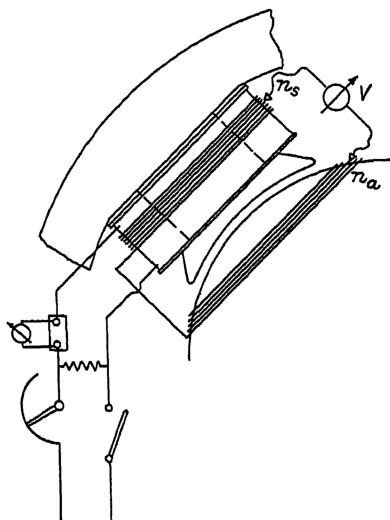


Fig. 118. Nullmethode zur Bestimmung der Streuung.

Sind an der Schenkelprüfspule n_s Windungen eingeschaltet, an der Ankerprüfspule n_a, dann gilt also

$$\Phi_a \cdot n_a = \Phi_s \cdot n_s,$$

folglich

$$\sigma_a = \frac{\Phi_a}{\Phi_s} = \frac{n_s}{n_a}.$$

Man umgibt also Schenkel und Anker mit einigen Prüfwindungen, versieht das Millivoltmeter mit zwei Drähten, welche mit Spitzen versehen sind, um die Isolation der Prüfwindungen zu durchstechen und dadurch die eingeschalteten Windungen beliebig zu ändern. Da man aber meist nicht genügend viel Windungen umlegen kann, muß man aus den Ausschlägen interpolieren. Es sei z. B.:

$\left.\begin{matrix} n_a = 5 \\ n_s = 4 \end{matrix}\right\}$ dabei der Ausschlag am Voltmeter $a_1 = +2$ Skalenteile,

bei der Änderung der Windungen in:

$\left.\begin{matrix} n_a = 6 \\ n_s = 5 \end{matrix}\right\}$ sei der Voltmeterausschlag $a_2 = -1$ Skalenteil.

Es wird

$$\sigma_1 = \frac{n_s}{n_a} = \frac{4}{5} = 0{,}8,$$

$$\sigma_2 = \frac{n_s}{n_a} = \frac{5}{6} = 0{,}833.$$

Da der zu σ_2 gehörige Ausschlag a_2 kleiner ist, so liegt der wahre Wert σ näher an σ_2 als an σ_1 und außerdem ist auch $\sigma_1 < \sigma < \sigma_2$.

Es ergibt sich bei einer Erhöhung von $\sigma_2 - \sigma_1 = 0{,}033$ eine Änderung des Ausschlages von $+2$ auf -1, also um -3 Skalenteile, folglich müßte sich σ_1 nicht um 0,033 ändern, sondern um

$$x = \frac{2 \cdot 0{,}033}{3} = 0{,}022;$$

der wahre Wert wird also:

$$\sigma = \sigma_1 + x = 0{,}8 + 0{,}022 = 0{,}822.$$

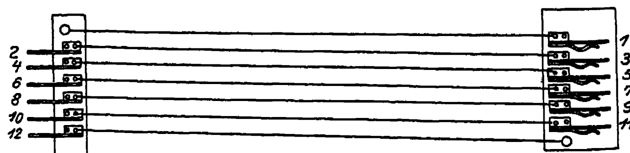


Fig. 119. Prüfspule von Veprek.

Um das unbequeme Durchstechen der Drähte zu vermeiden, ist von Veprek die in Fig. 119 gezeichnete Anordnung für die Prüfspulen mit Steckkontakten angegeben. Die einzelnen Drähte sind direkt in einem Kabel vereinigt und lassen sich deshalb leicht und schnell auflegen.

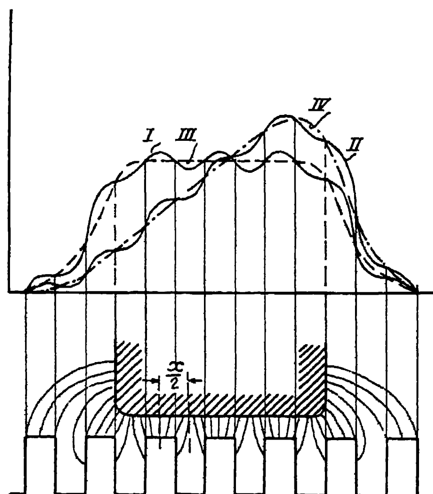


Fig. 120. Kraftfluß zwischen Anker und Pol.

Feldverteilung unter den Polen.

In Fig. 120 ist ein Stück eines Magnetpoles mit den ihm gegenüberstehenden Zähnen des Ankers gezeichnet. Die Dichte der Kraftlinien ist, wie auch in der Figur eingezeichnet, dort am größten, wo der kürzeste Weg durch Luft vorhanden ist, also vor den Zähnen. Nach den Polkanten zu nimmt die Dichte der Kraftlinien allmählich ab. Die Kurve für die Feldverteilung unter einem Pol wird daher

bei Leerlauf den in Fig. 120 eingezeichneten Verlauf der Wellenlinie *I* haben, deren Schwankungen absichtlich etwas übertrieben sind, weil in Wirklichkeit die Zahl der Zähne unter einem Pol größer ist als in Fig. 120. Außerdem sind die Schwankungen des Feldes, direkt unter dem Pol gemessen, kleiner als auf der Oberfläche des Ankers, so daß die Aufnahme einer mittleren Kurve *III* genügt, welche punktiert gezeichnet ist. Bei voller Belastung der Maschine ändert sich die Feldverteilung, weil das durch die Querwindungen des Ankers erzeugte Feld eine Verschiebung der Kraftflußverteilung bewirkt nach einer Kurve *II*, deren mittleren Wert die Kurve *IV* darstellt, woraus sich die bekannte stärkere Sättigung der einen Polkante gegenüber derjenigen der anderen erkennen läßt. Diese Verschiebung der Kraftflußverteilung ist ein Grund zur Verschiebung der Bürsten bei Belastungsänderungen, und man sucht deshalb bei neueren Maschinen durch besondere Formen der Polschuhe und durch Anwendung namentlich der mit dem Ankerstrom erregten, zwischen den Hauptpolen sitzenden Wendepole diese Verschiebung der Kraftlinien zu vermeiden. Man erhält dadurch bei allen Belastungen unveränderliche Bürstenstellung und außerdem die Möglichkeit, soweit die Erwärmung der Maschine es erlaubt, sie vorübergehend ohne Feuern am Kollektor überlasten zu können.

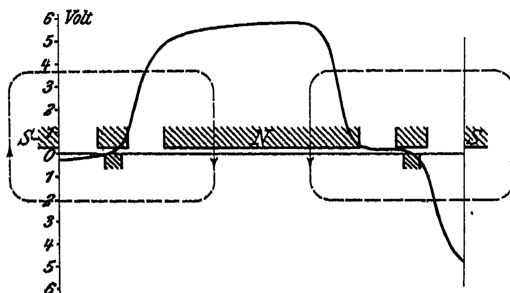


Fig. 121. Feldverteilung bei Wendepolen.

Den Einfluß der Wendepole auf die Feldverteilung zeigt Fig. 121, die einem Aufsatz vom Dipl.-Ing. E. Pelikan in ETZ 1907, S. 26 entnommen ist. Man erkennt daraus, daß die Verschiebung der Feldverteilung nach Kurve *IV* in Fig. 120 aufgehoben ist.

Da bei Wendepolen die Bürsten stets in die neutrale Zone, also gerade unter die Wendepole zu liegen kommen, kann man nur solche Methoden zur Aufnahme der Feldverteilung verwenden, die an der laufenden, normal arbeitenden Maschine angewendet werden können (es scheidet also die nachstehend beschriebene Anwendung der Wismutspirale bei Wendepolen aus). Durch die Kurzschlüsse in den Spulen, die gerade unter den Bürsten vorbeigleiten, entstehen besondere Felder, die auf die Felder der Wendepole einwirken, und diese Kurzschlüsse entstehen nur bei laufender Maschine.

Es ist sonst möglich, die für das Verhalten der Maschine bei Belastung maßgebende Kurve bei stillstehender Maschine ohne Wendepole mit der nachstehenden Wismutspirale zu ermitteln, indem man zunächst die Verteilung des Feldes bei Leerlauf bestimmt (siehe Fig. 122). Dabei würden die Magnete mit der für Leerlauf zur Erzeugung der normalen Betriebsspannung erforderlichen Stromstärke erregt sein. Dann schaltet man die Magnetstromstärke aus, schiebt die Bürsten in die Betriebsstellung und leitet durch den stillstehenden Anker einen Strom von der Stärke des normalen Betriebsstromes der Maschine. Die Querwindungen des Ankers erzeugen dann das ebenfalls mit der Wismutspirale aufnehmbare Querfeld (Fig. 122). Aus Querfeld und Leerlaufsfeld resultiert die Feldverteilung bei Belastung, die einfach die Summe der beiden anderen Felder ist.

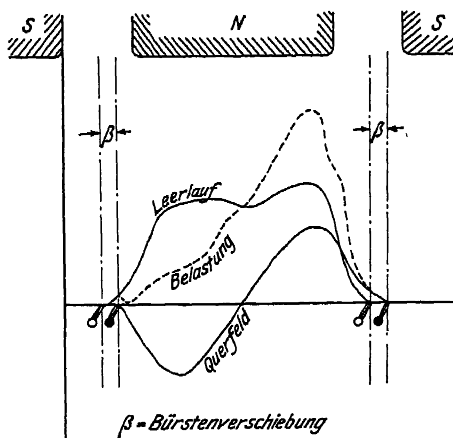


Fig. 122. Bestimmung des Belastungsfeldes aus Leerlaufsfeld und Querfeld des Ankers.

In Fig. 120 ist in Kurve *III* der ideale Fall der Feldverteilung bei Leerlauf gegeben. Die Leerlaufsverteilung in Fig. 122 entspricht der Wirklichkeit. Man findet nämlich stets auch bei Leerlauf eine geringe Verstärkung der Felddichte an der einen Pol-

kante — eine Folge der schon erwähnten Hysteresis des Eisens — und in der Mitte eine geringe sattelförmige Einsenkung, die davon herrührt, daß mitten unter dem Pol im Anker der Kraftfluß nach zwei entgegengesetzten Richtungen auseinandergeht.

Der Inhalt der Fläche, den die Feldkurven mit den Koordinaten einschließen, ist maßgebend für die Induktion in den Ankerdrähten, weil er die Kraftlinienzahl unter den Polen darstellt. Da die elektromotorische Kraft des Ankers zwischen Leerlauf und Belastung nur um den geringen Spannungsverlust infolge des Ohmschen Widerstandes der Ankerwickelungen voneinander verschieden ist, so muß der Flächeninhalt der Leerlaufskurve und der der Belastungskurve stets ungefähr der gleiche sein.

Zur Aufnahme der Feldverteilung an stillstehenden Maschinen ohne Wendepole kann die **Wismutspirale** von Hartmann & Braun benutzt werden, deren Ausführung Fig. 123 zeigt. Eine bifilar ge-

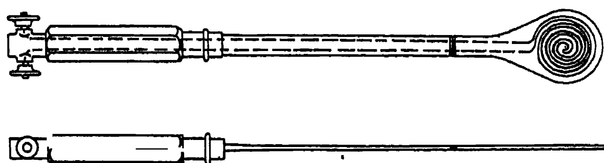


Fig. 123. Wismutspirale von Hartmann & Braun.

wickelte, zwischen zwei Glimmerblättchen befindliche ganz flache Spirale aus sehr feinem Wismutdraht ist mit Handgriff aus Hartgummi versehen. Die Enden der Spirale führen nach zwei am Griff befindlichen Klemmen. Wismut hat die Eigenschaft, seinen Ohmschen Widerstand zu ändern, wenn es in ein magnetisches Feld gebracht wird, und zwar ändert sich der Widerstand des Wismuts gesetzmäßig mit der Dichte des Magnetfeldes, wie nachstehend gezeigt werden soll.

Es hängt aber der Widerstand des Wismuts außerdem noch, wie bei allen Metallen, von der Temperatur ab, und deshalb kann man die Wismutspirale, die zwecks Messung der Felddichte an die entsprechende Stelle zwischen Pol und Anker geschoben werden muß, bei der laufenden Maschine nicht verwenden. Eine Induktion im Innern der Spirale durch die Kraftflußschwankungen infolge der sich bewegenden Zähne ist wegen ihrer bifilaren Wickelung

ausgeschlossen, aber es läßt sich die Temperatur der Luft zwischen Pol und Anker nicht messen, die stets höher ist als die Temperatur der Luft außerhalb der Maschine.

Die Abhängigkeit des Ohmschen Widerstandes des Wismuts von der Kraftliniendichte wird für jede Spirale bestimmt und eine Eichkurve (Fig. 124) aufgezeichnet, welche die Abhängigkeit der

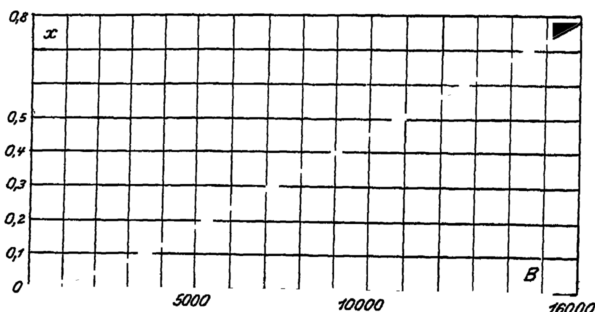


Fig. 124. Eichkurve einer Wismutspirale.

Anzahl Kraftlinien für 1 cm^2, also die Sättigung B, von der Widerstandszunahme x der Spirale darstellt. Aus dieser Eichkurve, welche leicht aufzunehmen ist, indem man die Sättigung B ballistisch bestimmt und gleichzeitig den Widerstand der Spirale mißt, kann man rückwärts dann aus einer beobachteten Widerstandszunahme x der Spirale auf die magnetische Induktion B schließen.

Da der Widerstand des Wismuts aber auch von der Temperatur abhängt, muß die Eichkurve auf eine bestimmte Temperatur bezogen werden. Die **Korrektur der Temperatur** geschieht nach der Formel:

$$B = B_1 \cdot \left(1 + \frac{a \cdot t}{100}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

wobei B_1 gemessener Wert, $\alpha = 0{,}354\,\%$ der Temperaturkoeffizient für Wismut und t die Temperaturdifferenz ist zwischen derjenigen der Eichkurve und der bei der Messung vorhandenen Temperatur.

Um die rechnerische **Korrektion der Temperatur** zu vermeiden, führen Hartmann & Braun die **Schaltung** nach Fig. 125 aus. Diese Schaltung ist in elektrischer Beziehung gleichbedeutend mit der in Fig. 67 dargestellten Wheatstoneschen Brücke; es sind

deshalb hier die einzelnen Widerstände ebenso bezeichnet wie dort. Es gilt also für den Fall, daß das Galvanometer G stromlos ist:

$$\frac{a}{r} = \frac{b}{x}.$$

Die Widerstände r und b werden aber zunächst vor der Messung der Temperatur entsprechend korrigiert, indem der Schleif-

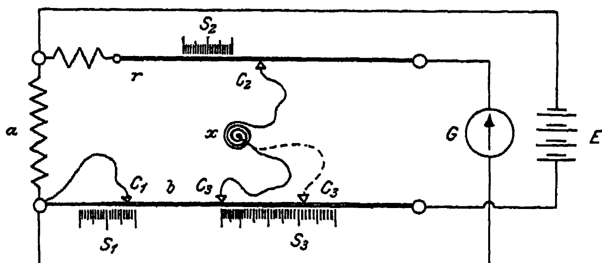


Fig. 125. Schaltung der Wismutspirale mit Temperaturkorrektion.

kontakt C_1 auf den Punkt der Skala S_1 gestellt wird, welcher der am Thermometer abgelesenen Temperatur gleich ist. C_3 muß auf dem Anfangspunkt der Skala S_3 stehen, dann wird C_2 auf S_2 verschoben, bis das Galvanometer stromlos ist. Die Wismutspirale x kann nun in das zu messende Feld gebracht werden, wobei ihr Widerstand sich, wie früher gesagt, der Feldstärke entsprechend ändert, also das Gleichgewicht der Brücke gestört wird. Der infolgedessen am Galvanometer auftretende Ausschlag wird jetzt nur durch Verschieben von C_3 zum Verschwinden gebracht und die Feldstärke B kann auf der Skala S_3 direkt abgelesen werden.

Bei der Aufnahme der Feldverteilungskurve mit der Wismutspirale muß man darauf achten, daß die Spirale immer nur um die halbe Zahnteilung, also um $\frac{x}{2}$ in Fig. 120 unter dem Pol verschoben werden darf, damit man in richtiger Reihenfolge die hoch und tief liegenden Punkte der wellenförmigen Feldverteilungskurve aufnimmt.

Die meist bei Gleichstrommaschinen angewendete Methode zur Aufnahme besteht in der **Messung der Spannung zwischen zwei Kommutatorlamellen.** Hierbei muß natürlich die Maschine laufen und kann außerdem im richtigen Betriebszustand untersucht werden.

In Fig. 126 ist ein Magnetpol mit einem darunter befindlichen Stück eines Ringankers mit Spiralwickelung gezeichnet. Zwei schmale Bürsten b, deren Entfernung in diesem Falle sowie bei Parallelwickelung überhaupt gleich der Breite einer Lamelle gemacht wird, bei Reihenparallelschaltung aber a Lamellen betragen muß, wenn a die halbe Zahl der parallelen Ankerstromzweige ist, werden auf dem Kollektor verschoben, jedesmal die Spannung zwischen den Lamellen gemessen und abhängig von der Entfernung x zwischen der neutralen Zone D_0 und der gemessenen Stelle in einem Koordinatensystem aufgetragen, wie Fig. 127 zeigt. Aus dem vorhin Gesagten ist ersichtlich, daß diese Kurven nur bei Ringankern mit Spiralwickelung die Feldverteilung unter einem Pol in Volt ausgedrückt angeben. Bei Trommelankern mit Parallelwickelung liegen aber die beiden zu einer Spule gehörigen Hälften

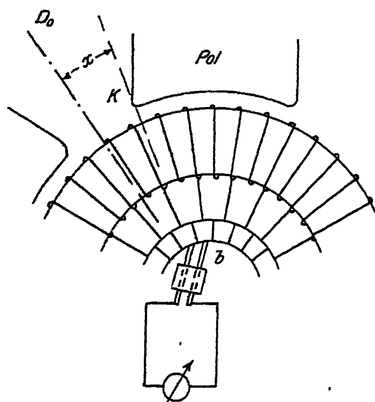


Fig. 126. Aufnahme der Feldverteilung mit Voltmeter.

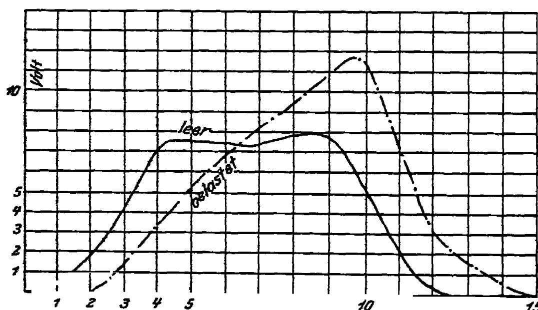


Fig. 127. Feldverteilung in Volt nach Schaltung 126 bestimmt.

immer unter zwei benachbarten Polen und bei Reihenschaltung und Reihenparallelschaltung wird sogar die mittlere Feldverteilungskurve unter sämtlichen Polen bestimmt; man muß also,

um aus der gemessenen Feldverteilung auf diejenige unter einem Pol zu schließen, die gemessenen Werte durch die Zahl der Spulenhälften teilen, welche man durchlaufen muß, um von der einen Lamelle nach derjenigen zu gelangen, auf der die zweite Bürste schleift.

Man kann auch die mittlere Feldverteilungskurve nach Fig. 128 aufnehmen, wobei das Voltmeter einmal fest mit der normalen Bürste $+B$ verbunden wird, während der zweite Draht mit einer kleinen Hilfsbürste b verbunden ist, die immer weiter auf dem Kollektor verschoben wird. In Fig. 129 ist der Verlauf zweier derartiger Kurven gezeichnet. Beide Kurven sind nichts anderes als die Summe der Ordinaten der entsprechenden Kurven in Fig. 127; man braucht also in Fig. 129 von jeder Ordinate nur die vorhergehende abzuziehen und die Differenz aufzutragen, abhängig von x, so erhält man die Kurven nach Fig. 127.

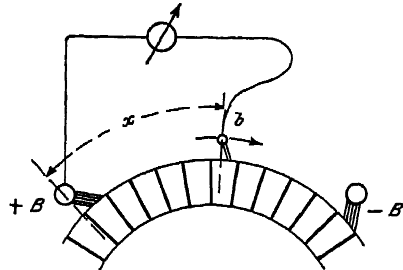


Fig. 128. Aufnahme der Feldverteilung mit einer verschiebbaren Bürste.

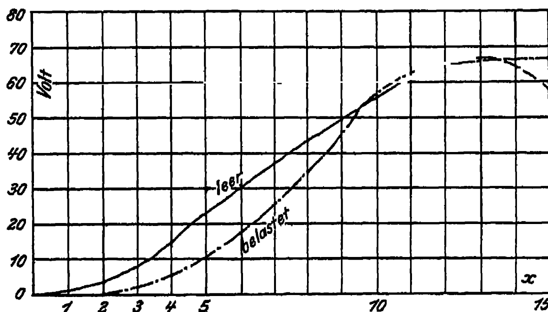


Fig. 129. Feldkurven in Volt nach Schaltung 128 bestimmt.

Die Umrechnung des Voltmaßstabes der Ordinaten in Sättigungswerte B ist umständlich und ziemlich wertlos, da die Kurven nur ein Bild für die Feldverteilung liefern sollen, aus der die Wirkungsweise der Maschine beurteilt werden kann und zu ersehen ist, welche Änderungen namentlich an den Polen oder der Ankerwicke-

lung auszuführen sind, um bessere Verhältnisse zu erhalten. Hierzu genügt der Voltmaßstab. Übrigens braucht man nur, um umständliche Rechnungen zu vermeiden, eine beliebige Ordinate (also an einer beliebigen Stelle x) mit der Wismutspirale aufzunehmen, bei Stillstand und normal wie bei Leerlauf erregtem Magnetsystem, um daraus den Maßstab für B zu erhalten.

Eine weitere Vorrichtung zur Aufnahme der Feldverteilung, die aber hauptsächlich ein Bild über die Verteilung im allgemeinen, weniger über die Größe derselben geben soll, zeigt Fig. 130. Sie eignet sich auch nur für stillstehende Gleichstrommaschinen. Es ist S eine lange flache Spule, an einem flachen Arm befestigt, so daß sie sich mit dem Arm in den Luftspalt einer Maschine einschieben läßt. Sie wird durch Spiralfedern $f_1 f_2$, die gleichzeitig zur Stromleitung für die Spule dienen, in einer bestimmten Lage gehalten. Auf der Achse der Spule ist ein kleiner Spiegel befestigt und über diesem an einem zweiten Arm eine Skala a und ein Fernrohr F. Die Gradteilung T wird am Gestell der Maschine befestigt, so daß der Zeiger z die Stellumg des Armes zeigen kann, während mit dem Klemmstück A der ganze Apparat an einem Bürstenbolzen der Bürstenbrücke festgeklemmt wird. Um den Apparat für verschieden große Maschinen brauchbar zu machen, ist das Klemmstück A mit zwei Flügelschrauben und Schlitz verstellbar gemacht. An die mit den Spiralfedern verbundenen Klemmen wird während der Messung ein Gleichstrom angeschlossen, dessen Stärke i mit einem regelbaren Widerstand genau konstant gehalten wird. Zur Kontrolle des Stromes dient das angeschlossene Amperemeter. Befindet sich nun die stromdurchflossene Spule S in einem magnetischen Felde, so erfährt sie ein Drehmoment, welches proportional der Stärke des Feldes ist, wenn der Strom in ihr konstant

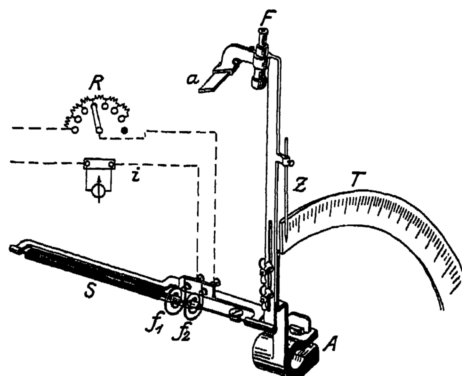


Fig. 130. Einrichtung zur Bestimmung der allgemeinen Feldverteilung.

bleibt. Da als Gegenkraft Federn wirken, ist auch die Verdrehung der Spule, die mit Skala, Spiegel und Fernrohr beobachtet wird, proportional der Feldstärke und die Größe der Verdrehung, abhängig von der an der Teilung T mit dem Zeiger z abgelesenen Stellung des Apparates zu den Polkanten ist ein Bild für die Feldverteilung unter den Polen. Bei der Aufnahme der Feldverteilung stellt man die Bürstenbrücke so ein, daß die Spule zwischen zwei Polen steht. Dann dreht man vor jeder Beobachtung die Bürstenbrücke weiter, so daß die Spule unter einem Pol hindurch bis zur Mitte zwischen die beiden nächsten gelangt. Zeichnet man die beobachteten Ablenkungswinkel, oder einfach die Längen auf, die man von der Nullage aus im Fernrohr beobachtet, abhängig von der Lage der Spule zu den Polen, die man an der Teilung T ablesen kann, so ist die aufgezeichnete Kurve ein genaues Bild der Feldverteilung. Die Nullage wird im Fernrohr bestimmt, wenn die Spule S ohne Strom ist. Um aus der Feldverteilung die Größe der Induktion B im Luftraum zu finden, muß man den Apparat eichen, indem man ihn in ein bekanntes Feld bringt und bei demselben Strom i, der während der Beobachtung an der Maschine in der Spule floß, die Ablenkung im Fernrohr bestimmt.

Bestimmung der Wellenform von Wechselströmen.

Für Wechselstrommaschinen, namentlich die normalen mit umlaufendem Magnetrad, wird die Bestimmung der Feldverteilung nach den bisher gegebenen Methoden unausführbar. Man kann überhaupt die direkte Feldverteilung einer Wechselstrommaschine nicht so einfach bestimmen, weil, wie nachstehend gezeigt ist, die Art der Wickelung auf die Messung Einfluß hat und nur die normale Wickelung zur Messung benutzt werden kann, wenn man nicht besondere Versuchsmaschinen ausführt, die für den Zweck dieses Buches ausscheiden.

Der Augenblickswert eines Wechselstromes hängt ab von der Stellung der induzierten Spule zu den induzierenden Magneten. In Fig. 131 sei $a\,b$ die induzierte Spule. Steht diese Spule in der gezeichneten Lage, dann durchdringt ihre auf den Seiten a und b liegenden Drähte kein Kraftfluß; die in ihr induzierte elektromotorische Kraft (EMK) ist also, gleichgültig, ob die Spule oder die Magnete sich bewegen, in der Stellung $1\,1'$ Null. Nimmt die Spule die Lage $2\,2'$ zu den Magneten ein, dann wird eine EMK

entsprechend der Ordinate der Feldkurve in Fig. 131 an den Stellen *2* und *2'* in der Spule erzeugt, weil die Spulenseiten *a* und *b* in die schwachen Felder an den Polkanten der Magnete eintreten. Bei weiterer Bewegung von *3* bis *5* bleibt das Feld unter dem Pol ziemlich konstant, die induzierte Spannung der Spule wird also ebenfalls einen konstanten und gleichzeitig ihren höchsten Wert haben; gelangt die Spulenseite *a* von *5* nach *6*, so nimmt die Spannung der Spule allmählich wieder ab, bei *1'* ist sie Null geworden. Bei noch weiterer Bewegung gelangt die Spulenseite *a* bei *2'* unter den Pol *s*, unter dem vorher *b* lag, während die Spulenseite *b* unter den

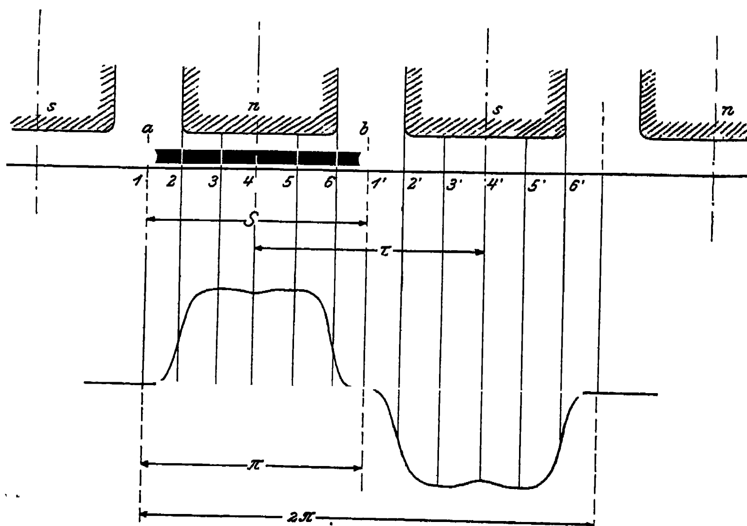


Fig. 131. Feldverteilung einer Wechselstrommaschine.

nächsten Pol *n* rückt. Jetzt kehrt sich die induzierte Spannung in beiden Spulenseiten gegen vorher um. Es verläuft in diesem Fall die Kurve der induzierten Spannung genau wie die Feldverteilungskurve in Fig. 131. Bei einer 2poligen Maschine ist die gezeichnete Kurve nach einer Umdrehung durchlaufen, bei einer Maschine mit *P* Polen wird sie durchlaufen sein nach:

$$\frac{n}{60 \cdot \frac{P}{2}} = \frac{n}{60 \cdot p} \text{ Umdrehungen,}$$

wenn *p* die halbe Polzahl und *n* die Umdrehungszahl in der Minute

bedeutet. Der in Fig. 131 gezeichnete Teil der Kurve heißt eine Periode oder Welle (ν).

Die Form der Kurve hängt zunächst von der Feldverteilung unter den Polen ab, sie hängt aber außerdem ab von der Art der Wickelung; ist die Breite der Spule S nicht gleich der Polteilung τ, sondern z. B. kleiner, dann sind die in beiden Spulenseiten a und b hintereinander geschalteten *EMKK* nicht gleichgroß, sondern während a schon unter einem Pol liegt, befindet sich b vielleicht erst eben vor einem Pol, und wenn die Seite a schon unter ihrem Pol heraus ist, ist b eben erst im Begriff, herauszutreten. Der Verlauf der Kurve wird jetzt erhalten durch die Summe der gleichzeitigen Augenblickswerte in den beiden hintereinander geschalteten Spulenseiten a und b. Besitzt die Spule eine Breite $S = \tau$, dann ist die resultierende Kurve die Summe von zwei gleichen Kurven, die in Fig. 132 mit *1* bezeichnet sind, so daß Kurve *2* die Summe bedeutet. Ist $S < \tau$, dann wird die Spulenseite a früher induziert als die Spulenseite b; der Verlauf beider Kurven für sich ist der gleiche, sie sind nur gegeneinander verschoben, wie Fig. 132 ebenfalls zeigt. Die Resultierende ist wieder die Summe der Augenblickswerte, ihr Verlauf natürlich von dem für $S = \tau$ verschieden.

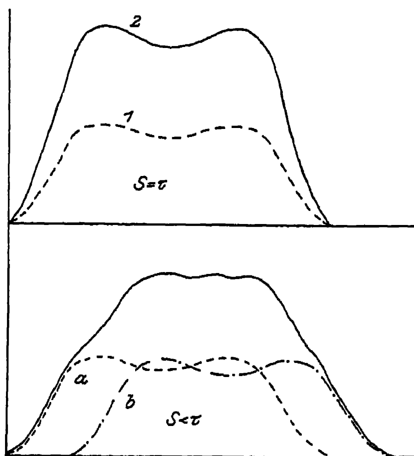


Fig. 132. Einfluß der Spulenbreite auf die Form der Spannungskurve.

Häufig kann man annehmen, die Wechselstromkurve sei eine Sinuskurve. In Wirklichkeit ist dies aber durchaus nicht immer zutreffend. Um die Leistung der Maschine genau zu bestimmen, zerlegt man ihre Stromkurve, indem man sie auffaßt als die Summe einer Anzahl Sinuskurven von verschiedener Periode und Amplitude. Derartige Auflösungsverfahren sind mehrere bekannt, ihre Erläuterung würde hier aber zu weit führen.

Es sollen jedoch einige Einrichtungen besprochen werden, ver-

mittels derer man die Kurven der Wechselstrommaschinen direkt aufnehmen kann.

Die grundlegende Erfindung zu diesem Zweck, auf der sich spätere Apparate aufbauten, war die Joubertsche Scheibe, Fig. 133. Eine drehbare Scheibe aus Isoliermaterial, die bei S ein Metallstück besitzt, welches mit einem Metallring r verbunden ist, wird so mit der Welle der zu untersuchenden Maschine M verbunden, daß ihre Umdrehungszahl in bestimmtem Verhältnis zur Umdrehungszahl der Maschine steht. Am besten gibt man ihr eine solche Übersetzung, daß sie sich einmal umdreht, wenn das Polrad der Maschine sich um die Polteilung verschoben hat. Wenn n die Umlaufszahl der zu untersuchenden Maschine ist, P ihre Polzahl, so muß die Scheibe eine Umlaufszahl n_1 besitzen von der Größe:

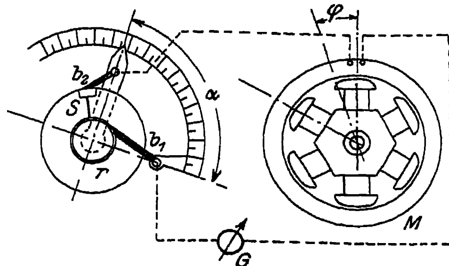


Fig. 133. Scheibe von Joubert.

$$n_1 = n \cdot P.$$

Es wird dann die Bürste b_2, die auf der Isolierscheibe liegt und an einem drehbaren Hebel befestigt ist, an einer Stelle das Metallstück s berühren, welches einer Verschiebung des Magnetrades der Maschine um einen Winkel φ entspricht und als Winkel α an der Teilung der Scheibe abgelesen werden kann. Der Winkel φ bestimmt sich aus α nach der Beziehung:

$$\varphi = \frac{\alpha}{P}.$$

Durch Verstellen des Hebels der Bürste b_2 kann man α und damit φ, oder aber den Augenblick, in dem durch die Berührung der Bürste b_2 mit dem Metallstück s der Strom geschlossen wird, beliebig innerhalb der Polteilung verändern. Ist z. B. bei G ein Voltmeter angeschlossen, so wird dies die Spannung anzeigen, die die Maschine in dem Augenblick liefert, wo das Magnetrad sich mit dem augenblicklich oben befindlichen Pol um den Winkel φ gedreht hat. Jedesmal wenn der Pol wieder an dieselbe Stelle kommt, wird wieder der Meßstrom geschlossen. Durch die Ver-

schiebung der Bürste b_2 kann man also die einzelnen Augenblickswerte der Spannungskurve für den Polbogen nacheinander aufnehmen. Für genauere Messungen ist aber die Joubertsche Scheibe weniger geeignet, sie wird jedoch bei anderen Apparaten angewendet.

Ein solcher Apparat zur Aufnahme von Wechselstromkurven, bei dem die Joubertscheibe in verbesserter Form benutzt wird, ist die von Dr. Rudolf Franke, Hannover angegebene. Ausführung und Anwendung des Apparates ergeben sich aus Fig. 134. Von der untersuchten Maschine aus wird durch eine biegsame Welle W und eine zwischengeschaltete Zahnradübersetzung die Welle des Apparates mit den Scheiben S_1, S_3 und S_4 mit einer

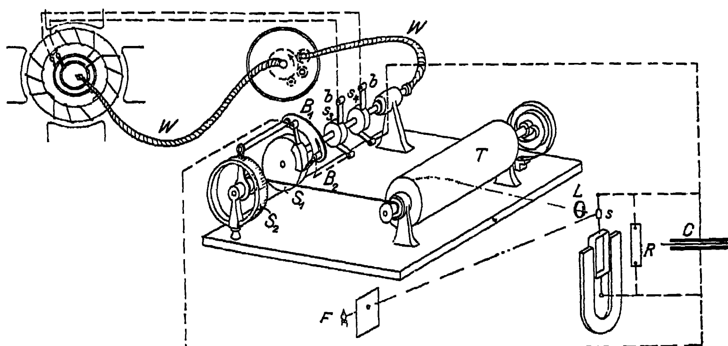


Fig. 134. Apparat von Franke zur Aufnahme periodischer Vorgänge.

solchen Umdrehungszahl angetrieben, daß sie einer Halbperiode der Maschine entspricht. Hat also die Maschine P Pole, dann muß die Tourenzahl der Scheiben S_1, S_3 und S_4 genau so wie bei der Joubertscheibe werden:

$$n_1 = n \cdot P,$$

wenn n die Tourenzahl der untersuchten Maschine ist. Auf der Scheibe S_1, welche der Joubertscheibe entspricht, befindet sich ein Kontaktstück aus Metall, auf welchem eine sehr kurze Zeit lang die Bürsten B_1 und B_2 gleichzeitig schleifen. Diese Zeitdauer läßt sich dadurch, daß die eine Bürste B_2 gegen die andere B_1 verstellbar ist, beliebig kurz einstellen. An die Bürsten b b wird der zu untersuchende Wechselstrom von der Maschine aus angeschlossen. Das Drehspul-Spiegelgalvanometer mit parallel-

geschaltetem Dämpfwiderstand R und Kondensator C liegt hintereinander mit der Kontaktvorrichtung auf der Scheibe S_1. Es erfolgt der Stromschluß immer nur in einem ganz bestimmten Augenblick der Kurve, der abhängt von dem Augenblick, in welchem die Bürsten B_1 und B_2 gleichzeitig durch das Metallstück auf der Scheibe S_1 verbunden sind, also von der Stellung der Bürsten. Es zeigt dann das Galvanometer einen diesem Augenblickswert der Kurve entsprechenden Ausschlag, der vermittels der durch eine Öffnung scheinenden Flamme F, des Spiegels s und der Linse L als Lichtfleck auf der Trommel T erscheint und um so weiter vom vorderen Rand der Trommel entfernt ist, je größer der Augenblickswert der Kurve ist. Will man einen anderen Augenblickswert der Kurve aufnehmen, dann verstellt man die beiden Bürsten B_1 B_2, deren Stellung an einer Teilung auf S_2 abgelesen werden kann, durch Verdrehen des Halters, an dem sie befestigt sind. Dadurch dreht man aber gleichzeitig auch die Trommel T, welche durch eine Schnur mit der Stellvorrichtung der Bürsten verbunden ist und durch eine an ihrem anderen Ende angebrachte Feder entgegengesetzt zu drehen versucht wird, so daß die Schnur immer straff bleibt. Die Stellung der Trommel entspricht also genau der Stellung der Bürsten, von der es abhängt, welcher Augenblickswert der Kurve gemessen wird. In der gezeichneten Stellung wird gerade der höchste Punkt des periodischen Verlaufs der Spannung der Maschine aufgenommen, weil gerade zu der Zeit der Kontakt auf der Scheibe S_1 erfolgt, wo alle Windungen einer Spule unter dem Pol liegen. Würde man die Bürsten B_1 B_2 weiter nach vorn oder wieder zurückschieben, dann würde der Kontakt erfolgen zu einer Zeit, wo noch nicht alle Windungen der Spule unter dem Pol liegen oder wo sie zum Teil schon unter dem Pol vorbei sind. Der Strom, welcher durch das Galvanometer geht, würde dann weniger stark sein und der Lichtfleck wäre dementsprechend weniger weit von der unteren Kante der Trommel T entfernt. Auf der Trommel wird also der zeitliche Verlauf der Kurve genau aufgezeichnet, wenn die jeweilige Stellung des Lichtfleckes aufgezeichnet wird. Am ausgeführten Apparat verfolgt man den Lichtfleck auf der Trommel mit einem durch ein Handrad wagerecht verschiebbaren Bleistift, denn auch der Lichtfleck wandert ja nur wagerecht; sobald er seine Entfernung vom unteren Trommelrand ändert, ist die Stellung der Trommel auch eine andere. Die untersuchte Kurve wird also durch den Apparat in zwei Komponenten zerlegt; die eine fällt in die

Drehrichtung der Trommel, die andere ist senkrecht dazu. Auch die Verstellung der Bürsten B_1 B_2 erfolgt in bequemer Weise durch ein Handrad.

Das Galvanometer muß für diesen Zweck besonders ausgeführt werden und erfordert eine Dämpfung durch Parallelschaltung eines Widerstandes R; außerdem ist wegen der kurzen Zeitdauer des Kontaktes auf der Scheibe S_1 der Kondensator C notwendig. Das Galvanometer würde dem kurzen Stoß gar nicht genügend schnell folgen können, wenn nicht durch diesen der Kondensator zuerst geladen würde und sich dann rückwärts durch das Galvanometer entladen könnte. Durch den Kondensator wird also das Galvanometer unabhängig von der Zeitdauer des Kontaktes und demnach bei allen Tourenzahlen der Scheibe S_1 in gleicher Weise genau zeigen.

Mit der Joubert-Scheibe und dem Apparat von Dr. Franke lassen sich die Kurven nur punktförmig aufnehmen, deshalb sind sie auch nur brauchbar für die Aufnahme solcher Kurven, die periodisch verlaufen, die also nach gleichen Zeitabschnitten immer wieder dieselben Werte annehmen, wie es Strom- und Spannungskurven von Maschinen im Betriebszustand bei konstant gehaltener Belastung sind. Handelt es sich aber um rasch verlaufende veränderliche Vorgänge, z. B. das Verhalten der Spannung beim Parallelschalten von Wechselstrom-Maschinen, Vorgänge beim Öffnen oder Schließen eines Wechselstromkreises und ähnliche sich mitunter innerhalb sehr kurzer Zeit abspielende Vorgänge, so muß man die Oszillographen zur Aufnahme benutzen.

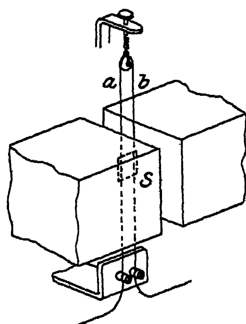


Fig. 135. Grundform des Blondel-Oszillographen.

Die Grundform eines von Blondel angegebenen Oszillographen zeigt Fig. 135. In dem schmalen Luftspalt zwischen den Polen eines starken Magneten, gewöhnlich Elektromagneten, mit konstant zu haltendem Felde befindet sich eine dünne Drahtschleife $a\,b$, die am einen Ende mit Anschlußklemmen für den zu untersuchenden Stromkreis versehen ist und am anderen Ende über eine Rolle geführt ist, die an einer Feder hängt, durch welche die Schleife gespannt gehalten wird. In der Mitte der Schleife,

mitten im Feld der Pole gelegen, ist ein kleiner Spiegel *S* an den Drähten befestigt. Dadurch, daß in den beiden Drähten der Schleife der Meßstrom entgegengesetzt fließt, wird die Schleife gedreht, je nach der Richtung des Stromes in verschiedenem Sinne. Bei den sehr kleinen Ablenkungswinkeln ist Proportionalität zwischen Ausschlag und Strom vorhanden. Die Schleife muß sich für jeden Strom so schnell als möglich und ohne Eigenschwingungen, also aperiodisch einstellen. Ihre eigene Schwingungsdauer muß gegenüber einer Periode einer gewöhnlichen Wechselstromkurve verschwindend klein sein und die Dämpfung muß stark sein. Es lassen sich solche Schleifen ausführen, die $\frac{1}{1000}$ Sekunde Eigenschwingungsdauer haben.

Zu einem fertigen Oszillographen gehören dann die Apparate in Fig. 136. *M* ist der Elektromagnet, dessen Feld durch den Erregerstrom desselben genau konstant gehalten wird. Zwischen seinen Polen ist die Schleife eingesetzt. Von einer Bogenlampe aus wird durch ein kleines Loch *L* und eine Linsen- und zuweilen noch Spiegelkombination ein Lichtstrahl *1* auf den Spiegel geworfen; den dieser in der Richtung *2* gegen eine Trommel *T* zurückwirft. Die Trommel, welche durch einen Motor schnell gedreht wird, ist mit lichtempfindlichem Papier überzogen, so daß die Schwingungen des Spiegels, die in einer zur Achse der Trommel parallelen Ebene erfolgen, als Kurven fixiert werden. Meist sind zwei Schleifen nebeneinander angeordnet, um Strom- und Spannungskurven gleichzeitig aufnehmen zu können.

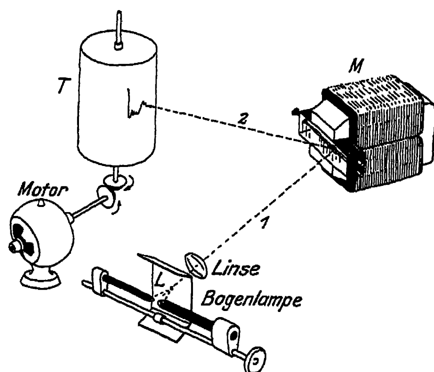


Fig. 136. Zusammenbau eines Oszillographen.

Die Firma Siemens & Halske liefert vollständig zusammengestellte Oszillographen mit mehreren Schleifen, die verschiedene Schwingungsdauer haben, und mit Rücksicht auf den aufzunehmenden Vorgang benutzt werden müssen.

Siebenter Abschnitt.

Wirkungsgrad und Belastungsfähigkeit elektrischer Maschinen.

Unter Wirkungsgrad einer Maschine versteht man ganz allgemein das Verhältnis zwischen der abgegebenen oder der Nutzleistung und der zugeführten Leistung; bezeichnet man den Wirkungsgrad mit η, so ist also

$$\eta = \frac{\textbf{Nutzleistung}}{\textbf{zugeführte Leistung}} \quad \ldots\ldots \quad (37)$$

Bei elektrischen Generatoren gibt man gewöhnlich die Nutzleistung in Watt, die zugeführte Leistung in Pferdestärken an, bei Motoren verfährt man umgekehrt. Da in Formel (37) Nutzleistung und zugeführte Leistung dieselbe Wertigkeit besitzen müssen, so sind die Pferdestärken N mit 736 zu multiplizieren, wodurch sie in Watt verwandelt werden. Es ergibt sich dann der Wirkungsgrad

$$\textbf{für Generatoren } \eta = \frac{\textbf{nützliche Watt}}{N \cdot 736} \quad \ldots \quad (38)$$

$$\textbf{für Motoren } \eta = \frac{\textbf{abgegebene } N \cdot 736}{\textbf{zugeführte Watt}} \quad \ldots \quad (39)$$

Bei Motoren sowohl als wie bei Generatoren ist für N die Beziehung gültig:

$$N = \frac{\textbf{Drehmoment} \cdot 2\pi \cdot n}{60 \cdot 75} \quad \ldots\ldots \quad (40)$$

Dabei ist n die Umlaufszahl in der Minute und das Drehmoment in mkg einzusetzen.

Bestimmung der Nutzleistung bei Generatoren.

Die Nutzleistung, welche bei Generatoren als elektrische Energie auftritt, wird mit elektrischen Meßinstrumenten bestimmt.

Die bei den Generatoren zum Zwecke der Messung vorzunehmenden Schaltungen sind nach Art der Maschinen verschieden. Generatoren, deren Klemmenspannung bei verschiedenen Belastungen konstant bleiben soll, kann man mit Glühlampen belasten; es gehören hierher die Nebenschlußmaschine, die Maschine mit gemischter Schaltung (Kompoundmaschine) und die Wechsel-

und Drehstromgeneratoren. Letztere sind aber dann induktionslos belastet; will man sie induktiv belasten, dann muß man sie mit Motoren belasten. Gleichstrommaschinen mit Serienschaltung haben eine je nach der Belastung verschiedene Klemmenspannung, sie werden daher mit Wasserwiderständen belastet.

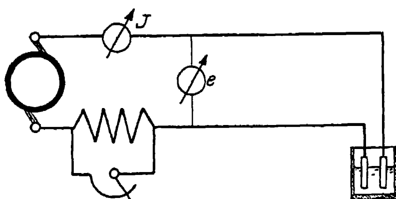


Fig. 137. Leistungsmessung bei der Hauptstrommaschine.

In Fig. 137 ist die **Hauptstrommaschine** gezeichnet, in Fig. 138 die **Nebenschlußmaschine** und in den Fig. 139 und 140 die beiden üblichen Arten der **Kompound- oder Verbundmaschine,** in Fig. 139 diejenige mit kurzem Schluß der Nebenschlußwickelung, in Fig. 140 diejenige mit langem Schluß.

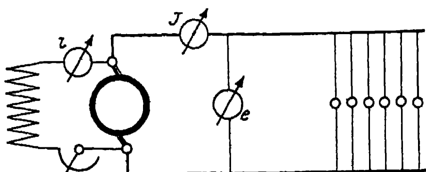


Fig. 138. Leistungsmessung bei der Nebenschlußmaschine.

Bei diesen sämtlichen Maschinenschaltungen ist die abgegebene elektrische Leistung, also die Nutzleistung, wenn sie als Generatoren arbeiten:

Nutzleistung $= J \cdot e$ in Watt.

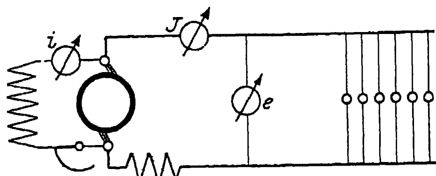


Fig. 139. Leistungsmessung bei der Verbundmaschine mit kurzem Schluß.

Dabei wird J mit einem Amperemeter, e mit einem Voltmeter gemessen, wobei die Schaltung beider Instrumente aus den Fig. 137 bis 140 zu ersehen ist.

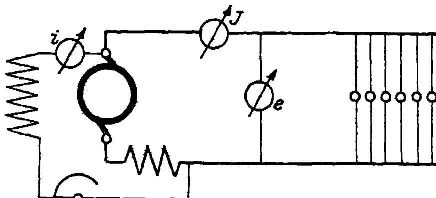


Fig. 140. Leistungsmessung bei der Verbundmaschine mit langem Schluß.

Bei **Wechsel- und Drehstromgeneratoren** wird die elektrische Leistung bestimmt durch die im zweiten Abschnitt behandelten Messungen der elektrischen Leistungen, woselbst auch die zugehörigen Schaltungen gezeichnet sind.

Wie schon erwähnt wurde, kann man Generatoren mit konstanter Spannung zweckmäßig mit **Glühlampen** belasten, falls man die Energie der Maschine nutzlos in Wärme umsetzen will. Be-

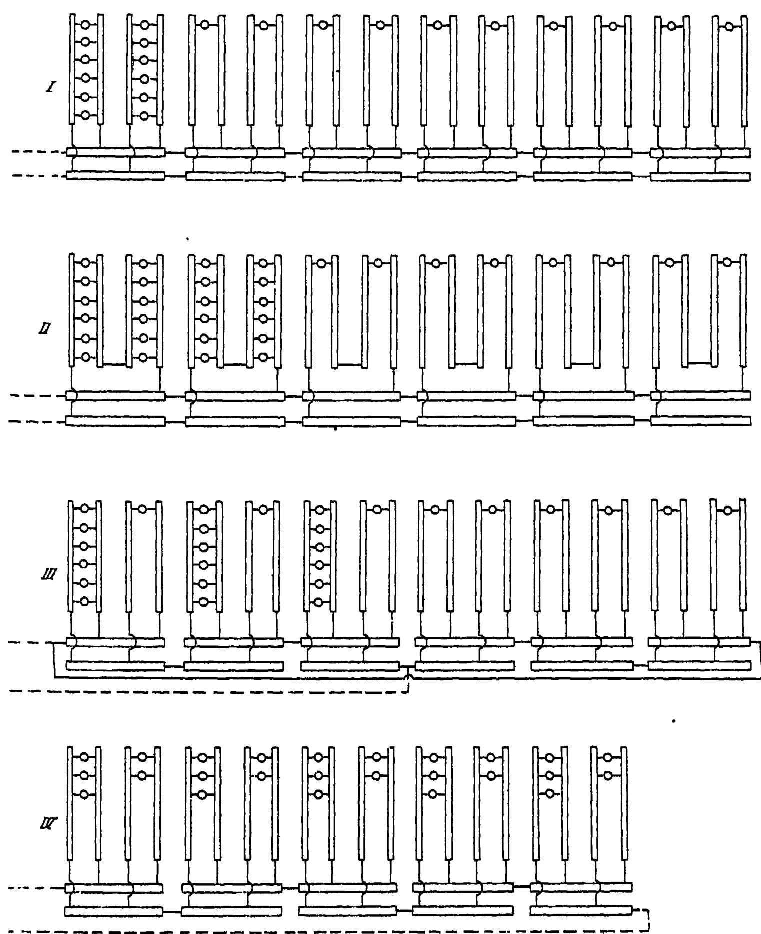


Fig. 141. Anpassung eines Glühlampenwiderstandes an verschiedene Spannungen.

sonders bequem ist diese Belastungsart bei Abnahmeversuchen von kleineren und mittleren Maschinen bis etwa 100 PS. Nach Fig. 141

versieht man 6 Bretter mit einer Anzahl Glühlampen und je 2 Schaltschienen. Schaltet man nach *I*, dann sind sämtliche Lampen parallel geschaltet. Ist eine Lampe für *E* Volt, dann muß in diesem Falle die Maschine auch *E* Volt haben. Hat die Maschine 2 *E* Volt, dann wird die Schaltung nach *II* ausgeführt, wo auf jedem Brett 2 Lampengruppen hintereinander geschaltet sind. Für 3 *E* wird Schaltung *III* und für 5 *E* Schaltung *IV* angewendet. Am besten eignen sich für diesen Fall hochkerzige und hochwattige Glühlampen, also alte Kohlenfadenlampen von 32 *HK* mit 3,3 Watt für 1 *HK*. Als Fassungen verwendet man einfache Brückenfassungen mit Edisongewinde nach Fig. 142, bei denen sich die Zahl der eingeschalteten Lampen durch einfaches Herumdrehen im Gewinde der Fassung ändern läßt. Die beiden Schienen, zwischen denen die Lampen nach Fig. 129 liegen, sind dann in Fig. 142 die Schiene *S* und der Draht *D*. Die Bretter lassen sich für Abnahmeversuche in einer Transportkiste verpacken, in die sie gleich mit den Glühlampen hineingeschoben werden.

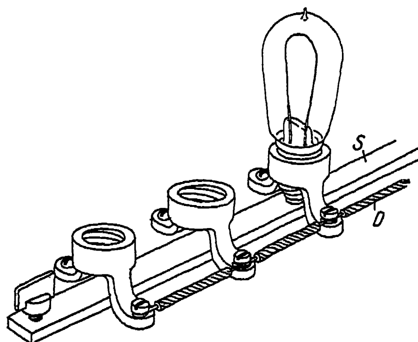


Fig. 142. Fassungen für einen Glühlampenwiderstand.

Eine andere Belastungsvorrichtung besteht in **Wasserwiderständen**: Hierzu kann man im einfachsten Fall ein oben offenes Faß verwenden. Man füllt es mit Wasser und legt eine Metallplatte auf den Boden; eine zweite hängt an einem Seil mit Rolle in das Wasser hinein. Jede der Platten ist mit je einem Pol der Maschine verbunden. Je stärker man die Maschine belasten will, um so tiefer läßt man die eine der Platten eintauchen. Die Wasserwiderstände haben zu Beginn ihrer Einschaltung meist hohen Widerstand, so daß die einstellbare Platte tief hineinhängen muß. Durch die sich entwickelnde Wärme und bei Gleichstrom auch durch die elektrolytische Zersetzung wird die Leitfähigkeit des Wassers rasch größer, so daß man die eine Platte immer mehr heben muß, damit die Belastung der Maschine konstant bleibt. Unangenehm ist bei den Wasserwiderständen ihre Dampfentwickelung, sie müssen daher vor

dem Maschinenhaus im Freien aufgestellt werden. Die Wasserwiderstände eignen sich zur Belastung für Gleich- und Wechselstrommaschinen, im letzten Fall aber nur für induktionslose Belastung.

Wechsel- und Drehstromgeneratoren müssen aber stets ihre Leistung bei einem bestimmten Leistungsfaktor (meist $\cos \varphi = 0{,}8$) hergeben können. Bei Belastungsversuchen die entsprechende Phasenverschiebung herzustellen, ist meist sehr schwierig; man bestimmt daher ihre Belastungsfähigkeit, wie später gezeigt wird, durch mehrere Messungen indirekt.

Sehr große Maschinen kann man ebenfalls schwierig bei Belastungsproben voll belasten. Man wendet in diesem Fall zweckmäßig einen Energiekreislauf an, damit man nicht eine zu große Energie nutzlos in Wärme umsetzt. Schaltungen dazu sind in folgendem gegeben.

Belastung großer Maschinen und Anwendung des Energiekreislaufes.

Bei der Probe größerer Maschinen ist es teuer, deren gesamte Energie durch Belastung mit Glühlampen, Wasserwiderständen usw. nutzlos in Wärme umzusetzen. Auf Prüffeldern von Fabriken ladet

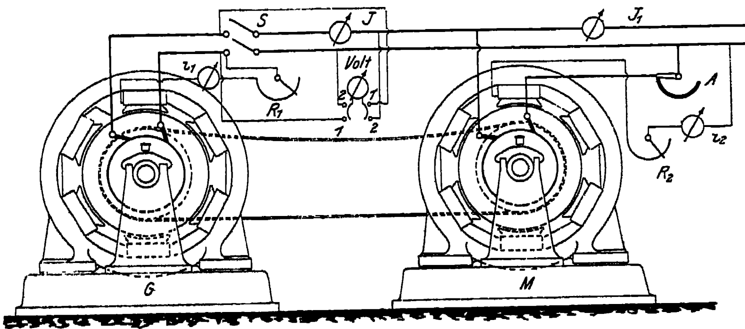


Fig. 143. Energiekreislauf bei Gleichstrom.

man daher vielfach **Akkumulatoren** mit den zu prüfenden Gleichstromgeneratoren. Eignet sich deren Spannung nicht für die vorhandene Batterie, so läßt man den Generator auf einen Motor arbeiten, welcher einen geeigneten zweiten Generator zum Laden der Batterie antreibt.

Sind mehrere gleichgroße Maschinen vorhanden, so kann man nach Kapp und Hopkinson einen **Energiekreislauf** anwenden, welcher immer darin besteht, daß man die angetriebene Maschine auf die antreibende zurückarbeiten läßt; dann brauchen dem ganzen System nur die Verluste zugeführt werden.

In Fig. 143 sind zwei **Gleichstrommaschinen** gezeichnet, welche belastet werden sollen. Man versieht beide mit einer Riemenscheibe und schaltet mit dem Regler R_2 zunächst den Erregerstrom für die Maschine M ein, welche als Motor laufen soll; darauf läßt man sie vom Netz aus an mit dem Anlasser A. Ist dieser kurzgeschlossen, dann laufen beide Maschinen, G von M aus durch den Riemen angetrieben. Bei zunächst noch offenem Schalter S wird dann der Regler R_1 eingeschaltet, so daß sich die Maschine G selbst erregt. Ist ihre Spannung gleich der Netzspannung, was man durch Vergleich der Spannungsmessungen auf *1—1* und *2—2* mit dem Voltmeter erkennt, dann wird S geschlossen. Durch weiteres Verstärken des Erregerstromes i_1 mit dem Regler R_1 kann dann der Generator beliebig belastet werden. Das Amperemeter J zeigt die Stromstärke an, welche G nach M liefert; es braucht dann dem Motor von außen her nur ein Strom J_1 zugeführt werden, der den Verlusten in beiden Maschinen entspricht, der also höchstens etwa 20 % von dem Strom J betragen wird.

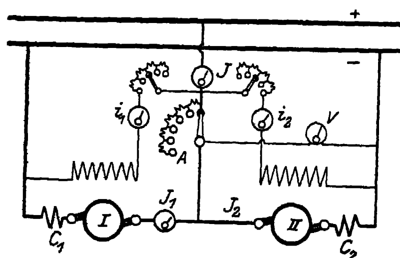


Fig. 144. Schaltung für die Kapp-Hopkinson-Methode.

Bei der Schaltung in Fig. 143 müssen die zu untersuchenden Maschinen G und M dieselbe Spannung haben, wie das Netz, welches die Verluste zuführt. Ist das nicht der Fall, dann muß man die zugeführte Spannung durch einen besonderen Generator erzeugen, welcher durch einen an das Netz angeschlossenen Motor angetrieben wird.

Bei der Kapp-Hopkinson-Methode, zu der eine besondere Schaltung der Apparate in Fig. 144 gezeichnet ist, während sonst nach der schon bei Fig. 143 beschriebenen Methode verfahren wird, kann man nach Drysdale folgende Berechnung anwenden: Man bestimmt den zugeführten Strom J, den Ankerstrom J_1, die Erregerströme i_1 und i_2, sowie die Spannung e mit dem Voltmeter V.

Durch Änderung der Erregung läuft die eine Maschine als Motor, die andere als Generator. In jedem Fall ist die Differenz zwischen der zugeführten und der vom Generator entnommenen Energie $= J \cdot e$. Die Eisen- und Reibungsverluste (über deren Bestimmung siehe Abschnitt VIII), welche bei guten Maschinen immer gleich sind, also die bekannten Leerlaufsverluste $J_0\, e$ bringt man in Abzug, so daß die Differenz $(J - J_0) \cdot e$ die Kupferverluste bedeuten. Teilt man diese auf die zwei Maschinen, so kommt auf Maschine I der Wert:

$$\frac{J_1^2}{J_1^2 + J_2^2}\,(J - J_0) \cdot e$$

und auf Maschine II kommt der Wert:

$$\frac{J_2^2}{J_1^2 + J_2^2}\,(J - J_0) \cdot e.$$

Der Wert J_2 kann aus den Amperemetern berechnet, oder durch ein weiteres Instrument gemessen werden. Hierzu muß nun noch jedesmal der halbe Leerlaufsverlust $\frac{J_0 \cdot e}{2}$ hinzu gezählt werden, um den ganzen Verlust und damit den Wirkungsgrad zu bestimmen. Versuche von 15 K. W. Maschinen, 110 Volt, 1150 Umdrehungen, haben die Übereinstimmung des Wirkungsgrades beider gleich großen Maschinen mit dem auf andere Weise ermittelten Wirkungsgrad bis herunter zu einer Belastung von 4 K.W. gezeigt. Von dort ergibt sich der Wirkungsgrad der als Motor laufenden Maschine um 1 % zu klein, weil mit Rücksicht auf die Feldschwächung im Motor diesem nicht der halbe Leerlaufsverlust zugesprochen werden darf. Maschinen über 10 K. W. dürften sich für diese Methode geeignet erweisen.

Von Lulofs ist ein Verfahren angegeben, die Kapp-Hopkinson-Methode an einer einzigen Maschine mit Schleifenwickelung (Parallelwickelung) ohne Ausgleichs- (Äquipotential-) Verbindungen anzuwenden. Man verbindet nach Fig. 145 die beiden positiven Bürsten durch ein Amperemeter A_3 und die beiden ne-

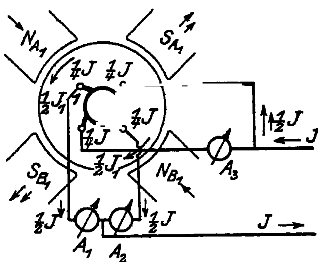


Fig. 145. Hopkinson-Kapp-Verfahren bei einer Maschine.

gativen Bürsten durch die Amperemeter A_1, A_2 und schaltet den Motor in der gezeichneten Weise an die Stromquelle an, so daß der Strom J zufließt. Dann wird die Erregung der beiden Südpole geändert, so daß man den Pol S_{A1} gerade so viel stärker macht, als man den anderen Pol S_{B1} schwächt, dann wird zwischen den positiven Bürsten ein Strom in beiden Ankerhälften fließen (Strom J_1). Diese Ankeramperewindungen erzeugen nun ein Querfeld, das den Nordpol N_{B1} stärkt und N_{A1} um gerade so viel schwächt. Dies bringt ebenfalls einen Strom im Anker hervor, der bei den negativen Bürsten abgenommen wird. Dieser Strom erzeugt aber ein Feld, das der zuerst hervorgerufenen Feldänderung in den Südpolen entgegenwirkt. Dieses störende Feld muß durch Änderung der Erregung von N_{B1} und N_{A1} aufgehoben werden. A_1 und A_2 zeigen dann den gleichen Strom an, und zwar die Hälfte des Leerlaufsstromes. A_3 zeigt den doppelten Strom in einer Ankerhälfte (J_1) + dem halben Leerlaufsstrom an. Der unter dem starken Pol S_{A1} vorübergehende Teil der Ankerwickelung führt den Strom $\frac{1}{2} J_1 + \frac{1}{4} J$ und wirkt motorisch und der unter dem schwachen Südpol S_{B1} vorübergehende Teil der Ankerwickelung führt den Strom $\frac{1}{2} J_1 - \frac{1}{4} J$ und wirkt stromerzeugend. Man stellt so ein, daß A_3 den der mittleren Belastung entsprechenden Strom anzeigt, dann geben die Instrumente $A_1 A_2$ den Leerlaufsstrom an, der, mit der Spannung multipliziert, die Verluste bei Vollast anzeigt.

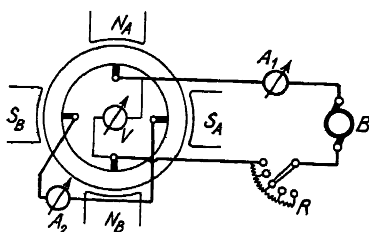


Fig. 146. Hopkinson-Kapp-Verfahren bei einer Maschine.

Ein zweites von demselben Entdecker wie das vorige herrührende Verfahren zeigt die Schaltung nach Fig. 146. Von einer Stromquelle B sendet man Strom J_1, gemessen mit Amperemeter A_1, zu den Bürsten des zu prüfenden Motors, den man mittels des Widerstandes $C\,R$ bis auf die Stärke des halben Vollaststromes bringt. Dann verstärkt man die Erregung von Pol N_A und schwächt diejenige von Pol N_B so lange, bis A_2 auch den halben Vollaststrom anzeigt. Das Produkt aus J_1 (gemessen mit A_1) und der

Spannung, gemessen mit dem Voltmeter V, gibt den Verlust bei voller Belastung an.

Synchrone Wechselstrommaschinen lassen sich nur auf sehr umständliche Weise durch den Energiekreislauf belasten. Wie aus Fig. 147 hervorgeht, wird dabei auch nicht viel (etwa 50 %) wiedergewonnen, denn es sind vier Maschinen dazu nötig. Es können nämlich beide Synchronmaschinen nicht mechanisch miteinander verbunden werden, weil beide synchron mit dem zugeführten

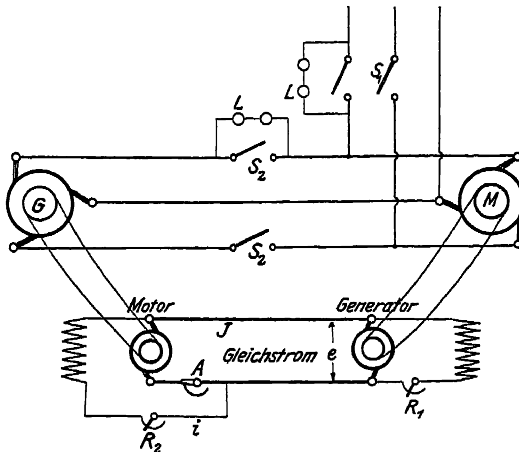


Fig. 147. Energiekreislauf bei synchronen Wechselstrommaschinen.

Wechselstrom laufen müssen, d. h. es müssen ihre Polräder mit der Umlaufszahl $n = \frac{\nu \cdot 60}{p}$ laufen, außerdem aber auch eine bestimmte vom Augenblickswert des Stromes abhängige Stellung haben. Es muß deshalb die als Motor laufende Synchronmaschine einen Gleichstrom-Generator von mindestens ihrer eigenen Leistung antreiben, dieser arbeitet auf einen gleichgroßen Gleichstrommotor, der dann die als Generator laufende Synchronmaschine antreibt. Die Belastung von G kann nur dadurch geändert werden, daß man die Energiezufuhr zu dem Gleichstrommotor ändert. Dieses muß aber ohne Änderung der Umlaufszahl des Motors geschehen, da G immer synchron laufen muß. Man muß deshalb die dem Gleichstrommotor vom Generator aus zugeführte Spannung e ändern, wodurch sich der Strom J ebenfalls ändert, gleichzeitig aber mit dem Regler R_2

den Magnetstrom i so einstellen, daß die Umlaufszahl konstant bleibt. Da durch Erhöhung von e die Tourenzahl sich ebenfalls erhöhen würde, muß hierbei der Magnetstrom i vergrößert werden, denn eine Verstärkung des Feldes bewirkt bei konstanter Spannung eine Verminderung der Umlaufszahl. Die Synchronmaschinen können nicht durch Änderung ihrer Magnetströme beliebig belastet werden, wie die Gleichstrommaschinen, eine Änderung ihres Magnetstromes hat nur eine Änderung der Phasenverschiebung der Ströme beider Maschinen zur Folge.

Zum Einschalten der beiden Synchronmaschinen M und G sind noch die Phasenlampen L in Fig. 147 erforderlich, deren hintereinander zu schaltende Anzahl aus der Summe der Spannungen beider Maschinen folgt. Die Maschine M, welche als Motor laufen soll, wird bei offenem Schalter S_1 durch ihre als Motor laufende Erregermaschine oder einen anderen Gleichstrommotor auf ihre

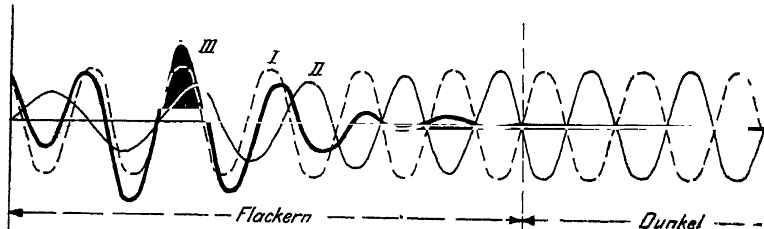


Fig. 148. Resultierender Strom bei Parallelschalten zweier Wechselstrommaschinen.

synchrone Umlaufszahl gebracht. Die Lampen L werden dann von einem Strom durchflossen, der der resultierenden Spannung aus M und dem speisenden Netz entspricht. Beim Anlaufen von M werden (natürlich immer noch bei offenem Schalter S_1) die Lampen stark flackern, weil die Kurve II der EMK von M, wie Fig. 148 zeigt, zunächst wegen ihrer zu langsamen Umlaufszahl flacher und von längerer Periode ist, als die gleichmäßig verlaufende Kurve I der Netzspannung und die resultierende Kurve III, die auf die Lampen wirkende Spannung infolgedessen ungleichförmig verläuft. Mit der zunehmenden Geschwindigkeit von M wird die Zeitdauer für eine Periode immer kürzer und die Spannung immer höher, bis sie schließlich die gleiche Größe wie die des Netzes und entgegengesetzte Phase erreicht hat. In dem Augenblick verlöschen

die Lampen und S_1 kann eingeschaltet werden. Ebenso ist nachher beim Einschalten von G zu verfahren.

Aus der vorstehenden Erläuterung ergibt sich, daß die Anwendung des Energiekreislaufes bei Synchronmaschinen sehr umständlich ist, es empfiehlt sich daher, die Belastungsfähigkeit dieser Maschinen durch die später Seite 160 gegebene indirekte Untersuchung zu bestimmen.

Kurven über das Verhalten von elektrischen Maschinen bei Belastung.

Das Verhalten von **Generatoren** bei Belastung ist von der Stromart und der Schaltung der Maschine abhängig. Für die Beurteilung eines Generators ist der Abfall der Klemmenspannung bei zunehmender Belastung sehr wichtig und daraus folgend bei Maschinen mit Verwendungszwecken für konstante Spannung die sogenannte **Regulierungskurve**, nämlich die Erregerstromstärke, abhängig von der Belastungsstromstärke bei konstanter Klemmenspannung.

Bei der **Hauptstrommaschine** steigt zunächst mit zunehmendem Belastungsstrom J die Klemmenspannung, wie Fig. 149 zeigt. Bei dieser Maschinenschaltung wird das Kraftlinienfeld von dem die Magnete, Anker und äußeren Stromkreis hintereinander durchfließenden Strom J erzeugt. Wie aus Fig. 112 hervorgeht, die nach der dort gegebenen Erklärung gleichbedeutend mit der Magnetisierungskurve ist, steigt für gleiche Stromzunahme in den Magneten das Feld bei geringeren Sättigungen im Eisen stärker als bei den höheren Sättigungen. Das Feld wird aber durch die Rückwirkung des durch den Strom im Anker erzeugten Ankerfeldes geschwächt. Diese Schwächung wird um so fühlbarer, je höher die

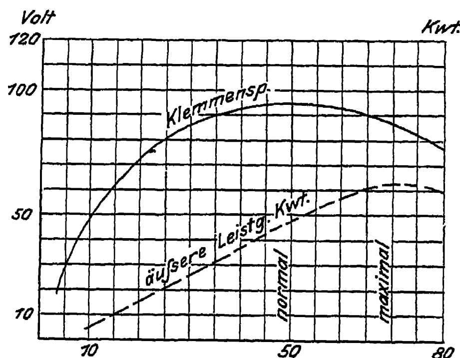


Fig. 149. Verhalten der Hauptstrommaschine bei Belastung.

Sättigung im Eisen ist. Außerdem geht von der durch das Feld induzierten *EMK* des Ankers, deren Kurve wegen der Rückwirkung des Ankerfeldes unter der Leerlaufscharakteristik bleibt, der proportional mit dem Ankerstrom zunehmende Ohmsche Spannungsverlust im Anker ab, so daß die Kurve der Klemmenspannung ein Maximum hat, welches allerdings erst bei einer solch hohen Stromstärke eintritt, daß es nicht bestimmt werden kann, weil die Wickelung des Ankers den dazu erforderlichen Strom nicht aushalten könnte. In Fig. 149 ist gleichzeitig die Kurve gezeichnet für die äußere Leistung in Kilowatt. Auch diese hat ein Maximum, welches aber ebenfalls über der normalen Leistung liegt. Bei einer brauchbaren Hauptstrommaschine müssen die größten Werte der Klemmenspannung und der äußeren Leistung immer erst nach der normalen Belastungsstromstärke eintreten, sonst ist die Maschine nicht überlastbar.

Für eine **Nebenschlußmaschine** zeigt Fig. 150 in der Kurve *I* den Abfall der Klemmenspannung. Bei dieser Maschine sind zwei Fälle möglich, entweder erregt sie sich selbst oder sie wird durch Fremdstrom erregt. Im letzten Falle, der der gewöhnliche ist, weil meist mehrere Maschinen parallel arbeiten oder eine Akkumulatorenbatterie vorhanden ist, bleibt der Magnetisierungsstrom konstant, wenn auch der äußere Strom J sich ändert. Bei Selbsterregung sinkt der Magnetisierungsstrom, wenn der äußere Strom J zunimmt. In beiden Fällen sinkt die Klemmenspannung, weil durch die Rückwirkung des Ankerfeldes das Hauptfeld der Maschine geschwächt wird und weil mit zunehmender Belastung der Spannungsverlust im Anker zunimmt. Bei Selbsterregung wird allerdings der Abfall der Klemmenspannung stärker sein als bei fremder Erregung.

Nebenschlußmaschinen werden durchweg in solchen Fällen verwendet, wo es auf konstante Spannung ankommt. Es muß daher durch Verstärkung des Magnetstromes i bei zunehmender Belastung J das Feld verstärkt werden, damit die Klemmenspannung konstant bleibt. Beträgt der Widerstand der Magnetwickelung $w_s = r_s\,\Omega$, dann ist die größtmögliche Erregerstromstärke

$$i_{max} = \frac{E_k}{r_s},$$

wenn E_k die normale Klemmenspannung bedeutet. Bezeichnet die Kurve *VI* den Zusammenhang zwischen der Belastungsstrom-

stärke J und der Erregerstromstärke i bei der normalen Spannung E_{k3}, dann ist J_{max} die höchste mögliche Belastung, weil die zugehörige Erregung i_{max} beträgt. In Kurve II ist die Leerlaufscharakteristik gezeichnet, also die Spannung abhängig von der Erregung $J = 0$. Die Kurven III, IV und V sind die Spannungen

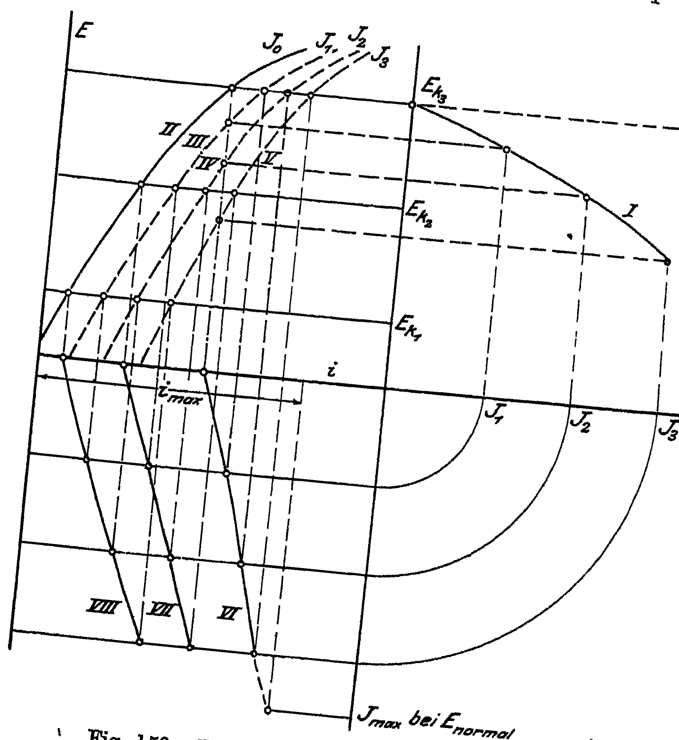


Fig. 150. Kurven der Nebenschlußmaschine.

abhängig von i bei den konstanten Belastungsströmen $J = J_1$, $J = J_2$ und $J = J_3$. Die Kurven VII und $VIII$ sind noch zwei Regulierungskurven für die beiden konstanten Spannungen E_{k1} und E_{k2}. Aus Fig. 150 erkennt man, wie die Kurven auseinander abgeleitet werden.

Die **Verbundmaschine** ist eine Maschinenschaltung, bei welcher Nebenschluß- und Hauptstrommaschine vereinigt sind. Sie wird

daher beider Eigenschaften gemeinsam haben und ihre Klemmenspannung infolgedessen zunächst ziemlich konstant verlaufen, wie Fig. 151 zeigt. Erst bei stärkerer Belastung fällt die Klemmen-

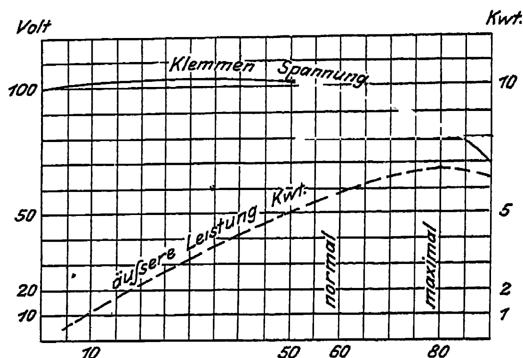


Fig. 151. Kurven der Verbundmaschinen.

spannung stärker ab. Innerhalb der normalen Belastungsgrenzen darf die Spannung sich nur wenig ändern.

Bei **Wechsel- und Drehstrommaschinen** ist natürlich die Regulierungskurve allein nicht maßgebend, wenn nicht gleichzeitig der Leistungsfaktor $\cos\varphi$ dazu angegeben ist. In Fig. 152 ist eine solche Kurve gezeichnet für eine Maschine von 600 Volt verketteter Spannung, Drehstrom bei einem Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0{,}8$. Die Maschine läuft mit zwei gleichen zusammen auf der Julienhütte in Bobrek. Sämtliche drei Generatoren sind mit Körtingschen Gasmaschinen gekuppelt und leisten maximal 200 *Kwt* bei $\cos\varphi = 0{,}8$ und 140 Umdrehungen. Auch für diese Art Maschinen bestimmt sich die größte mögliche Belastung durch die größte Erregerstromstärke, welche gegeben ist durch die größte

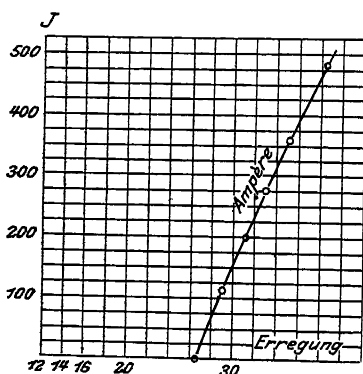


Fig. 152. Regulierungskurve einer Drehstrommaschine.

Spannung der Erregermaschine und den Widerstand der Magnetwickelung der Wechsel- oder Drehstrommaschinen.

Kurven über das Verhalten der Motoren bei Belastung.

Das wesentliche Verhalten des **Hauptstrommotors** wird wiedergegeben durch die Kurven in Fig. 153. Ihren Verlauf kann man aber nur innerhalb des stark ausgezogenen Teiles durch Messung bestimmen. Abszisse ist die abgegebene Leistung des Motors in PS. Die Umdrehungszahl n, abhängig von der abgegebenen Leistung, wird bei abnehmender Leistung immer höher und würde für die abgegebene Leistung Null, also Leerlauf, so hoch sein, daß sie gefahrbringend für den Motor wird. Man darf deshalb auch Hauptstrommotoren nie ohne Belastung arbeiten lassen.

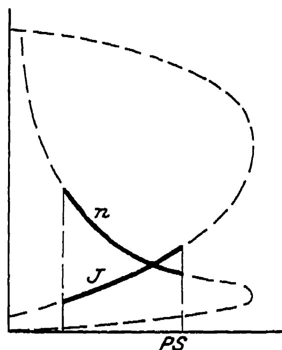


Fig. 153. Kurven des Hauptstrommotors.

Die Umdrehungszahl eines jeden Motors ist proportional der zugeführten Spannung abzüglich des Spannungsverlustes im Anker und umgekehrt proportional der Stärke seines magnetischen Feldes. Beim Hauptstrommotor wird das Feld infolge der Schaltung des Motors (Fig. 98) durch den ebenfalls die Magnetwickelung durchfließenden äußeren Strom erzeugt, bei schwacher Belastung ist also das Feld schwach. Da der Spannungsverlust im Anker bei Leerlauf und schwacher Belastung ebenfalls klein ist, so folgt daraus bei geringen Belastungen eine hohe Tourenzahl, die mit zunehmender Belastung immer weiter abnimmt. Die Stromstärke J nimmt mit zunehmender abgegebener Leistung zu und erreicht ihren höchsten Wert, wenn der Motor so stark belastet wird, daß er stehen bleibt. In diesem Falle ist:

$$J = \frac{E}{r_a + r_s},$$

wenn E die zugeführte Spannung, r_a den Ankerwiderstand, r_s den Magnetwiderstand bezeichnet.

Für alle übrigen Betriebszustände gilt:

$$J = \frac{E - E_g}{r_a + r_s};$$

dabei ist E_g die gegenelektromotorische Kraft des Ankers, gegeben durch die Beziehung

$$E_g = E - J \cdot (r_a + r_s) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (41)$$

Der Wirkungsgrad des Hauptstrommotors ist:

$$\eta = \frac{\text{PS} \cdot 736}{E \cdot J};$$

derselbe muß, wie bei „Bestimmung von Drehmomenten“ gezeigt, ermittelt werden.

Auch der **Nebenschlußmotor** ist gekennzeichnet durch n und J in Abhängigkeit seiner abgegebenen Leistung in PS. Der Verlauf dieser Kurven ist in Fig. 154 gegeben. J hat denselben Verlauf wie beim Hauptstrommotor. Die Tourenzahl n hat ebenfalls bei Leerlauf ihren höchsten Wert, derselbe weicht aber von der normalen Tourenzahl um höchstens bis 10 % ab, gewöhnlich um noch viel weniger. Die Abnahme der Tourenzahl ist innerhalb der normalen Belastungsgrenzen nur gering, sie kann sogar so klein werden, daß der Motor bei allen Belastungen innerhalb der normalen Grenzen mit derselben Tourenzahl arbeitet.

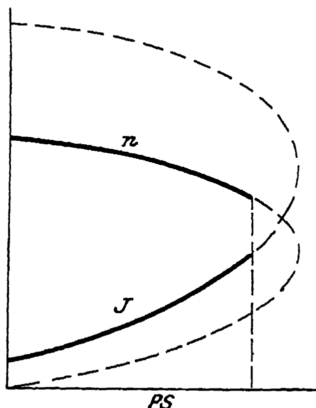


Fig. 154. Kurven des Nebenschlußmotors.

Beim Nebenschlußmotor wird das Feld durch den konstanten Magnetstrom i erzeugt (Fig. 97), und dieser ist konstant, da die zugeführte Klemmenspannung E konstant ist. Bei zunehmender Belastung wirkt die Rückwirkung des Ankers schwächend auf das Feld ein. Aus diesem Grunde müßte der Motor also bei zunehmender Belastung schneller laufen. Er braucht aber bei höherer Belastung, also bei dem schwächeren Felde, auch nur eine geringere Gegenspannung im Anker zu erzeugen, denn diese ist hier

$$E_g = E - (J - i) \cdot r_a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (42)$$

Beide Umstände wirken also entgegengesetzt und können sich direkt aufheben.

Der Wirkungsgrad dieses Motors ist ebenfalls:

$$\eta = \frac{\text{PS} \cdot 736}{E . J};$$

für seine Ermittelung gilt dasselbe wie beim Hauptstrommotor.

In Fig. 155 sind die Kurven des **Verbundmotors** gezeichnet. Dieser Motor ist ein Hauptstrommotor mit wenigen Nebenschlußwindungen. Diese Nebenschlußwindungen verlegen die bei Leerlauf gefährlich hohe Tourenzahl des Hauptstrommotors beim Verbundmotor auf einen zulässigen Wert. Durch die Hauptschlußwickelung erhält der Motor ein starkes Anlaufsmoment. Die Schaltung dieses Motors ist wieder wie beim Verbundgenerator in zwei Ausführungen möglich (Fig. 100). Für den Fall Fig. 100 *I* gilt:

$$E_g = E - J \cdot r_{s_2} - (J - i) \cdot r_a$$

und für den Fall Fig. 100 *II* gilt:

$$E_g = E - J \cdot (r_{s_2} + r_a).$$

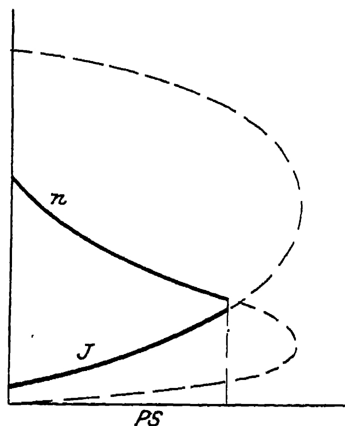


Fig. 155. Kurven des Verbundmotors.

In beiden Fällen ist der Wirkungsgrad wie bei den anderen Motoren:

$$\eta = \frac{\text{PS} \cdot 736}{E \cdot J}.$$

Bei allen drei Motoren verläuft die Kurve des Wirkungsgrades abhängig von der abgegebenen Leistung in PS genau so wie die Kurve für η in Fig. 156 beim Drehfeldmotor.

Das Verhalten des **asynchronen Drehfeldmotors** zeigt Fig. 156. Es ist ein Motor mit einer Nutzleistung von 10 PS gewählt. Bei jedem Wechselstrommotor ist außerdem auch die Kurve für den Leistungsfaktor cos φ mit anzugeben. Es ist hier der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{\text{PS} \cdot 736}{3 \frac{E}{\sqrt{3}} \cdot J \cdot \cos\varphi} \quad \ldots\ldots \quad (43)$$

gültig für Stern- oder Dreiecksschaltung, wenn E die zugeführte, bei Sternschaltung verkettete Spannung bedeutet, J die Stromstärke in einer der äußeren Zuleitungen.

Die Tourenzahl n des Motors nimmt mit zunehmender Belastung ab, weil die Zugkraft des Motors bei zunehmender Belastung stärker werden muß. Die Zugkraft ist aber proportional dem Produkt aus Läuferstrom und Feld. Letzteres ist innerhalb der normalen Grenzen der Belastung annähernd konstant, weil die zugeführte Spannung konstant ist. Folglich muß der Strom

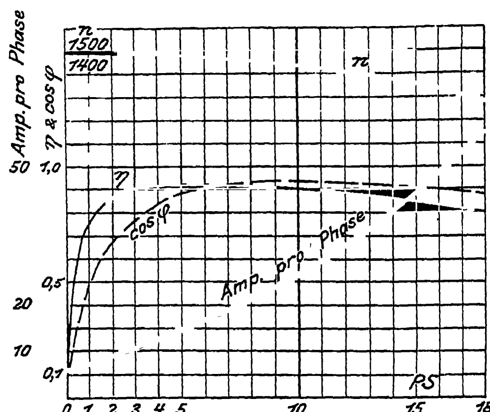


Fig. 156. Kurven des asynchronen Drehfeldmotors.

im Läufer mit der Belastung zunehmen, damit die Zugkraft stärker wird. Der Strom im Läufer wird hervorgerufen von der in ihm durch das Drehfeld induzierten *EMK*, bei zunehmender Belastung muß also diese *EMK* zunehmen. Die Entstehung einer *EMK* in den Drähten des Läufers ist nur möglich, wenn der durch diese hindurch gehende Kraftfluß des Drehfeldes sich ändert. Das Drehfeld hat aber, wie schon Seite 86 gesagt ist, die Geschwindigkeit:

$$n_1 = \frac{\nu \cdot 60}{p}.$$

Steht der Läufer still, dann bewegt sich das Drehfeld durch die Läuferdrähte mit der Geschwindigkeit n_1. Es entsteht eine hohe Spannung im Läufer und deshalb ein starker Strom, welcher aber durch seine Rückwirkung auf das Feld einen sehr großen Teil des Kraftflusses des Drehfeldes aus dem Läufer herausdrängt, also eine starke Streuung hervorruft. Bei mittleren und großen Motoren ist diese Schwächung des Feldes durch die Läuferströme

so stark, daß die Zugkraft des Motors nicht ausreicht, denselben mit Belastung anlaufen zu lassen. Man vergrößert deshalb durch Anlaßvorrichtungen den Widerstand im Läuferkreis, so daß die Ströme nicht in voller Stärke entstehen können. Es ist dann, trotz der geringeren Ströme, die Zugkraft ausreichend stark, um den Motor zum Anlaufen mit voller Belastung zu befähigen, weil das Feld nur noch unwesentlich geschwächt wird. Der Motor läuft an und mit der Zunahme seiner Geschwindigkeit wird der Widerstand des Anlassers verkleinert und schließlich der Läufer ganz kurz geschlossen. Die Umlaufszahl des Motors wird dabei einen solchen Wert annehmen, daß gerade diejenige *EMK* durch das Drehfeld im Läufer induziert wird, welche einen Strom in der Läuferwickelung hervorruft, der mit dem vorhandenen Felde die zur Überwindung des an der Riemenscheibe auftretenden mechanischen Widerstandes notwendige Zugkraft liefert. Da letztere mit der Belastung zunehmen muß, folgt daraus eine Abnahme der Tourenzahl des Motors mit der Belastung oder eine Zunahme der Differenz zwischen der konstanten Tourenzahl n_1 des Drehfeldes und der Tourenzahl n_2 des Läufers, also eine Zunahme der Schlüpftouren (Seite 86):

$$n_s = n_1 - n_2.$$

Aus dem vorstehend Gesagten über die Rückwirkung der Läuferströme auf das Feld des Motors ergibt sich, daß jeder Drehfeldmotor nur bis zu einem bestimmten höchsten Wert belastet werden kann. Belastet man ihn, vom Leerlauf beginnend, allmählich immer stärker, dann wird seine Schlüpfung und damit die Läuferströme immer stärker. Mit diesen nimmt aber die Streuung immer stärker zu, bis schließlich beim Überschreiten einer bestimmten Läuferstromstärke das Feld infolge Zunahme der Streuung so stark geschwächt wird, daß der Läufer nicht mehr die erforderliche Zugkraft entwickeln kann und stehen bleibt.

Die Größe der maximalen Zugkraft (oder des maximalen Drehmomentes = Zugkraft × Riemenscheiben-Halbmesser) ergibt sich sehr bequem aus dem Heylandschen Diagramm im nächsten Abschnitt, aus welchem überhaupt das ganze Verhalten des Motors bei beliebiger Belastung entnommen werden kann.

Mit dem asynchronen Drehfeldmotor ist auch der **asynchrone Einphasenmotor** erledigt. Dieser Motor ist ähnlich gebaut wie der Drehfeldmotor und muß mit Hilfsphase, in der künstlich

Phasenverschiebung hervorgerufen wird, angelassen werden. Motoren dieser Art können nicht mit Belastung anlaufen. Sie dürfen erst belastet werden, wenn sie ihre normale Umlaufszahl erreicht haben. Im regelrechten Betriebe verhalten sie sich dann ähnlich wie der asynchrone Drehfeldmotor, weil auch sie im Zustand des

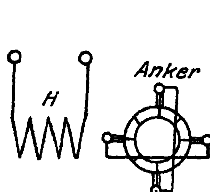


Fig. 157. Nebenschluß-Kurzschlußmotor.

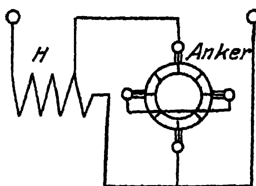


Fig. 158. Kompensierter Nebenschluß - Kurzschlußmotor. (Fynn u. Eichberg.)

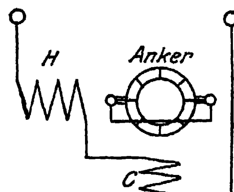


Fig. 159. Reihenkurzschlußmotor. (Atkinson.)

Betriebes mit einem Drehfeld arbeiten, welches durch die Wechselwirkung des Läuferfeldes und des primären Wechselfeldes zustande kommt. Es verlaufen deshalb auch die Kurven des asynchronen Einphasenmotors ähnlich wie die in Fig. 156 gezeichneten des asynchronen Drehfeldmotors. Nur ist der asynchrone Einphasenmotor weniger überlastbar und umständlicher anzulassen.

Sehr wichtige Motoren sind auch die **Kommutatormotoren für Einphasenstrom.** Der Anker eines solchen Motors ist genau wie ein Gleichstromanker ausgeführt. Das Magnetsystem kann

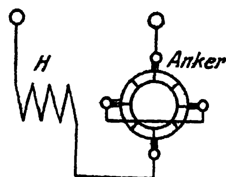


Fig. 160. Reihenkurzschlußmotor. (Winter-Eichberg-Latour.)

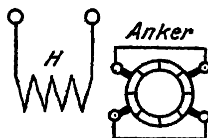


Fig. 161. Deri-Motor.

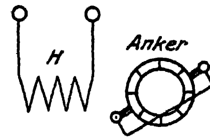


Fig. 162. Repulsionsmotor. (Elihu Thomson.)

mit ausgeprägten Polen versehen sein, erhält aber meist eine gewöhnliche Wechselstromwickelung. Auf jeden Fall muß aber das Magnetsystem aus Blechen aufgebaut sein. Da die Kollektormotoren für Wechselstrom noch neu und auch zum Teil noch in der Entwickelung begriffen sind, gibt es eine große Zahl von

Schaltungen, von denen die meisten gesetzlich geschützt sind. Infolgedessen sind die Motoren der einzelnen Firmen sehr verschieden. In den Fig. 157—164 sind eine Anzahl dieser Motoren dargestellt. Fig. 157 ist der Atkinson Nebenschluß-Kurzschlußmotor, der älteste Kollektormotor für Einphasenstrom. Aus ihm entstand der kompensierte Nebenschluß-Kurzschlußmotor von Fynn und Eichberg (Patent Union E. G.) Fig. 158. Beide Motoren arbeiten ähnlich, wie der Gleichstrom-Nebenschlußmotor, bei allen Belastungen mit fast konstanter Tourenzahl, allerdings bei Vollast etwas gegen Leerlauf abfallend. Die übrigen Motoren in den Fig. 157—164 arbeiten ähnlich wie die Gleichstrom-Hauptstrommotoren, mit niedriger Tourenzahl bei starker und hoher Tourenzahl bei schwacher Belastung. Bei Leerlauf gehen sie durch. Diejenigen unter ihnen, die mit einem kurzgeschlossenen Anker arbeiten, der gar nicht mit der Zu-

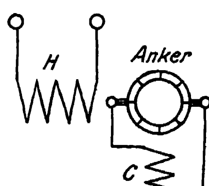


Fig. 163. Atkinson Repulsionsmotor.

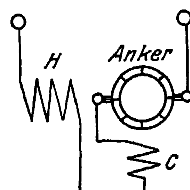


Fig. 164. Gewöhnlicher Reihenschluß mit Kompensation.

leitung verbunden ist, wie die Motoren nach Fig. 159, 162, 163 heißen auch Repulsionsmotoren. Werden diese Repulsionsmotoren mit Hochspannung betrieben, so braucht man keinen Transformator, da der Anker nicht mit der hohen Spannung in Berührung kommt, während alle übrigen Motoren, mit Ausnahme der in Fig. 157 und 161, einen Transformator zur Herabsetzung der Spannung erhalten müssen, weil der Kommutator Hochspannung nicht zuläßt. Der Motor nach Fig. 159 ist ein Reihenkurzschlußmotor nach Atkinson, der mit Kompensationswickelung *C* versehen ist und von den Bergmann-E.-W. für Straßenbahnzwecke angewendet wird. Fig. 160 ist ein Reihenkurzschlußmotor nach Winter-Eichberg-Latour, den die Allgem. Elektrizitäts-Gesellschaft ausführt. Fig. 161 zeigt den Deri-Motor von Bergmann-E.-W., bei dem ein Paar gegenüber liegende Bürsten durch Handrad verschiebbar sind.

Fig. 162 ist der Repulsionsmotor nach Elihu Thomson und Fig. 163 der Atkinson Repulsionsmotor, der wieder eine Kompensationswickelung C besitzt. In Fig. 164 ist der gewöhnliche Reihenschlußmotor mit Kompensationswickelung C dargestellt.

Die Repulsionsmotoren können meist ohne Anlasser auf die einfachste Art durch Verschiebung der Bürsten angelassen werden. Ihr Wirkungsgrad und ihre Belastungsfähigkeit wird am besten durch Bremsung festgestellt, indem dabei die zugeführten Watt mit Wattmeter gemessen werden. (Siehe über Bremsung unter: Bremsdynamometer zur Bestimmung des Drehmomentes.)

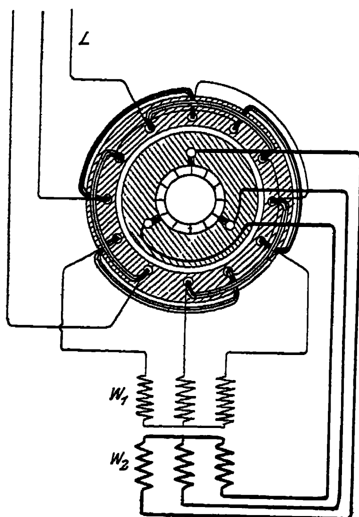
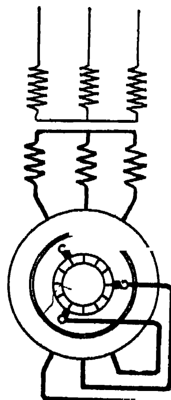


Fig. 165. Dreiphasenreihenschlußmotor mit Zwischentransformator.


Fig. 166. Dreiphasenreihenschlußmotor mit Vordertransformator.

Auch für **Dreiphasenstrom** können **Kommutatormotoren** benutzt werden, da aber der gewöhnliche asynchrone Drehfeldmotor keine besonderen Nachteile hat und zufriedenstellend arbeitet, benutzt man Kommutatormotoren bei Dreiphasenstrom nur, wenn die Umlaufszahl des Motors veränderlich sein soll. Die Tourenänderung geschieht auch hier wieder wie bei den einphasigen Kommutatormotoren, meist durch Bürstenverschiebung. Man kann auch hier Reihenschlußmotoren und Motoren mit Nebenschlußeigenschaften unterscheiden, die sich im Betriebe wie

der Gleichstrom-Hauptstrommotor zum Gleichstrom-Nebenschlußmotor verhalten. Beim Reihenschlußmotor liegen Feld und Läufer hintereinander. Da der Kommutator keine Hochspannung verträgt, so muß, da gewöhnlich Hochspannung verwendet wird, ein Transformator vorgeschaltet werden. Dieser Transformator kann als Zwischentransformator oder als Vordertransformator geschaltet werden. Der in Fig. 165 dargestellte Motor ist mit vierpoliger Feldwickelung ausgeführt, die durch die Zuleitung L Hochspannung erhält. Anker und Feld sind hintereinander geschaltet, aber mit Zwischenfügung eines Zwischentransformators, der die Hochspannung aus der Wickelung W_1 in der Wickelung W_2 in Niederspannung umsetzt, die dann dem Anker zugeführt wird. Will man auch dem Feld keine Hochspannung zuführen, was bei kleineren Motoren zu empfehlen ist, so wendet man die Schaltung nach Fig. 166 an, wo der Transformator vor den ganzen Motor geschaltet ist.

Zur Erzielung eines größeren Tourenveränderungsbereiches (bis zu 130°/₀ der normalen, während die gewöhnliche Grenze etwa 50°/₀ beträgt) unterteilen die Siemens-Schuckert-Werke A.-G. die Bürsten in zwei Gruppen, wie Fig. 167 zeigt. Die eine Gruppe der Bürsten bleibt fest stehen, die andere ist beweglich und dient zum Anlassen und Tourenregeln. Trotz ihres Reihenschluß-Charakters kann man diese Motoren zum Antrieb von Hobelbänken und ähnlichen Werkzeugmaschinen benutzen, bei denen die Reibung der bewegten Massen im Verhältnis zur Bearbeitung des Werkstückes groß ist. Der Motor läuft in solchem Fall bei Leergang der Werkzeugmaschine mit nur wenig höherer Tourenzahl als bei Vollast.

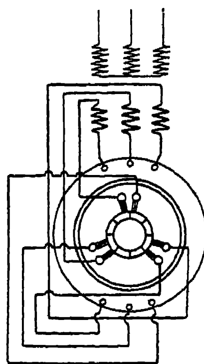


Fig. 167. Dreiphasenreihenschlußmotor der Siemens-Schuckert-Werke.

Die Firma Brown und Boveri führt für Dreiphasenstrom den Doppelrepulsionsmotor nach Fig. 168 aus, der eigentlich aus zwei miteinander verbundenen Einphasenrepulsionsmotoren M_1 M_2 besteht. Die Maschine hat zwei auf einer Welle sitzende Anker, deren Feldsysteme ganz eng zusammengerückt sind. Durch die dreiphasige Leitung L wird der Strom zugeführt, während jeder

der beiden Motoren für sich durch den vorgeschalteten Scott-Transformator einphasigen Wechselstrom erhält. Der Motor verhält sich im Betrieb, ebenso wie die anderen bis jetzt besprochenen Dreiphasen-Kommutator-Motoren, wie der Gleichstrom-Hauptstrom-Motor.

Der in Fig. 169 dargestellte Kommutator-Motor von Winter-Eichberg, den die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft ausführt, hat Nebenschlußeigenschaft, allerdings mit nicht ganz

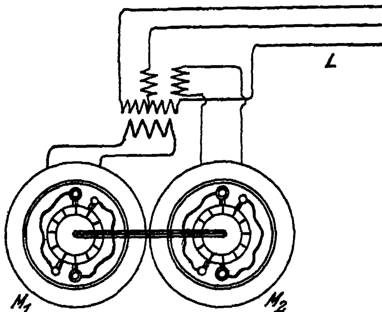


Fig. 168. Doppelrepulsionsmotor von Brown und Boveri.

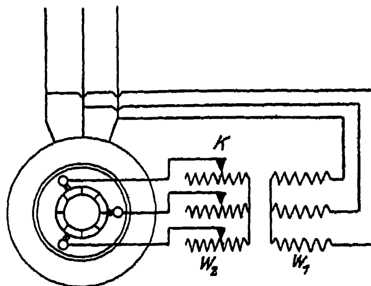


Fig. 169. Dreiphasen-Nebenschluß-motor von Winter-Eichberg.

konstanter Tourenzahl zwischen Vollast und Leerlauf. Hier liegt ein parallel zum Feld geschalteter Transformator $W_1 W_2$ vor dem Anker. Die Sekundärwickelung W_2 ist als Regeltransformator zum Anlassen und Tourenregeln ausgebildet.

Bezüglich der Bestimmung der Belastungsfähigkeit und des Wirkungsgrades gilt hier dasselbe, was über die Einphasen-Kommutator-Motoren in dieser Beziehung gesagt war. Für die Anschlüsse des Wattmeters sind die Seite 57 gegebenen Methoden bei Dreiphasenstrom zu beachten.

Indirekte Bestimmung der Belastungsfähigkeit von elektrischen Maschinen.

Die nachstehenden Methoden haben vornehmlich den Zweck, besonders bei großen Maschinen, welche man auf dem Prüffeld schwierig oder gar nicht belasten kann, trotzdem festzustellen, ob sie sich in der zu verlangenden Weise belasten lassen und wie hoch ihre Leistung sich steigern läßt.

Es gehört hierher zunächst das **Kreisdiagramm von Heyland,** bezüglich dessen Ableitung auf die Arbeiten von Heyland (ETZ 1895, S. 649 und „Eine Methode zu experimentellen Untersuchungen an Induktionsmotoren", Verlag Enke, Stuttgart) verwiesen werden muß.

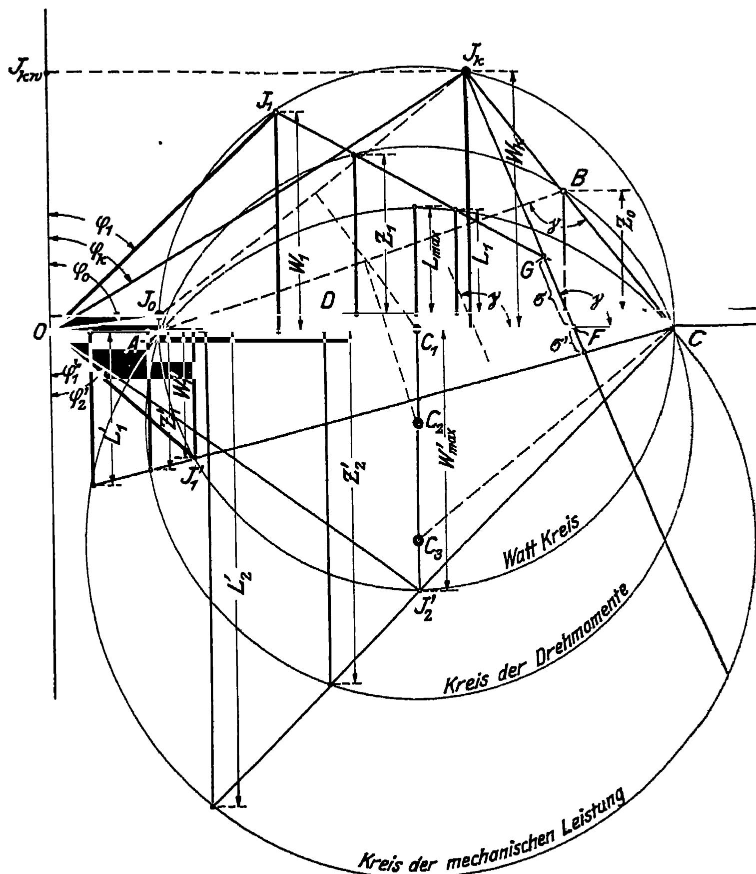


Fig. 170. Kreisdiagramm von Heyland.

Das Heylanddiagramm ist an Genauigkeit übertroffen worden durch das Ossanadiagramm (ETZ 1900). Letzteres ist aber auf Grund so einfacher weniger Messungen an der fertigen Maschine

nicht aufzuzeichnen und außerdem sind sehr umständliche Rechnungen beim Ossanadiagramm auszuführen, so daß seine Anwendung für die direkte Bestimmung der Belastung, die nur bei größeren Maschinen notwendig wird, nicht zu empfehlen ist, zumal die Ungenauigkeiten des Heylanddiagramms bei größeren Maschinen nicht ins Gewicht fallen; sie sind nur vorhanden für kleine Motoren und diese kann man immer direkt belasten und bremsen.

Das Kreisdiagramm von Heyland wird angewendet zur Untersuchung von asynchronen Drehfeldmotoren und Generatoren. Die Aufzeichnung ergibt sich aus Fig. 170.

An dem leer mit der normalen Spannung E zwischen den Zuleitungen und der normalen Stromwellenzahl (Periodenzahl) ν laufenden Motor wird gemessen:

1. **Leerlaufstrom** $= J_0$ **und Wattverbrauch** $= W_0'$ **pro Phase.** Darauf wird der Läufer festgebremst, daß er sich nicht drehen kann, und gemessen.
2. **Kurzschlußstrom** J_k **und Wattverbrauch** W_k **pro Phase.**
3. **Ohmscher Widerstand pro Phase** $= r_p$.

Bei der Messung 2 kann namentlich bei großen Motoren der Strom J_k unangenehm hoch werden, man bestimmt dann J_k und W_4 bei einer niedrigeren als der normalen Spannung und rechnet die Werte für das Diagramm auf die normale Spannung um.

Aus den unter 1 bis 3 aufgeführten Messungen kann man das Diagramm aufzeichnen.

Aus dem Wattverbrauch bei Leerlauf und der Spannung E ergibt sich der Wattstrom

$$\frac{W_0'}{E \cdot \sqrt{3}} = J_{w_0} = \overline{J_0 A} \text{ im Diagramm.}$$

Damit ist das rechtwinklige Dreieck $O J_0 A$ bestimmt und J_0 ist ein Punkt des Wattkreises. Ein zweiter Punkt dieses Kreises ist J_k, welcher gefunden wird dadurch, daß man den Wattstrom bei Kurzschluß J_{kw} auf der Ordinate aufträgt und das rechtwinklige Dreieck $O J_{kw} J_k$ aufzeichnet. Es ist dabei

$$J_{kw} = J_k \cdot \cos\varphi$$

und

$$\cos\varphi = \frac{W_k}{J_k \cdot E \cdot \sqrt{3}}.$$

Der Mittelpunkt des Wattkreises ist dann der Schnittpunkt C_1 der auf der Mitte der Strecke $J_0 J_k$ errichteten Senkrechten mit der Strecke OC.

Mit Hilfe des Wattkreises läßt sich zu jeder beliebigen Strom stärke OJ_1 die Phasenverschiebung φ_1 und die elektrische, dem Motor zuzuführende Energie in Watt aus dem Diagramm entnehmen. Der Wert der Strecke W_1 ergibt sich aus der bekannten Strecke W_k. Bezeichnen l_1 und l_k die den Strecken W_1 und W_k entsprechenden Längen, welche dem Diagramm entnommen sind, so wird die Wattzahl pro Phase:

$W_1 = W_k \cdot \frac{l_1}{l_k}$, die elektrische Gesamtleistung also: $3 \cdot W_1$.

Zwischen den Werten $J_0 = \overline{OJ_0}$ und $J_k = \overline{OJ_k}$ liegen sämtliche vorkommenden Stromstärken mit den zugehörigen Watt und den zugehörigen Leistungsfaktoren, die nach dem Phasenwinkel φ zu bestimmen sind. Der größte Leistungsfaktor, also die geringste Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, gehört zu derjenigen Stromstärke, welche gerade Tangente an den Wattkreis von O aus ist.

Der zweite Kreis, der Kreis der Drehmomente, muß durch die Punkte C und A gehen und ist bestimmt durch den Punkt B auf der Strecke $\overline{J_k C}$. Diese Strecke entspricht dem Verlustvektor der Spannung bei Kurzschluß, sie muß daher im Verhältnis der Spannungsverluste im Ständer und Läufer durch Punkt B geteilt werden. Die Strecke $J_k B$ entspricht dem Spannungsverlust E_{v_1} im Ständer, es gilt also:

$$\overline{J_k B} = \overline{OC} \cdot \frac{E_{v_1} \cdot \sqrt{3}}{E \cdot \sqrt{3}} = \overline{OC} \cdot \frac{E_{v_1}}{E},$$

dabei ist:

$$E_{v_1} = J_k \cdot r_p.$$

Verbindet man A mit B und errichtet auf $\overline{AB}$ eine Mittelsenkrechte, so findet man mit C_2 als Schnittpunkt dieser Mittelsenkrechten mit dem Lot in C_1 auf $\overline{OC}$ den Mittelpunkt des Kreises der Drehmomente.

Will man das Drehmoment wissen, welches bei einer beliebigen Stromstärke J_1 entwickelt wird, so verbindet man J_1 mit C_1, dann entspricht die Strecke Z_1 dem zugehörigen Drehmoment. Z_1 darf nur bis zu der durch den Punkt J_0 gehenden Parallelen zu $\overline{OC}$ ge-

messen werden, weil die Strecke $\overline{AJ_0}$ den Verlusten für Wirbelströme, Ummagnetisierung, Reibung und Stromwärme entspricht, welche als konstant angesehen werden. Der zahlenmäßige Wert des Drehmomentes läßt sich erst feststellen, nachdem der dritte Kreis, der Kreis der mechanischen Leistung, bestimmt ist. Dieser Kreis muß auch durch Punkt C gehen, aber so verlaufen, daß für den Fall, in welchem der Läufer festgebremst ist, also der Kurzschlußstrom $\overline{OJ_k} = J_h$ auftritt, die mechanische Leistung Null wird, es darf deshalb die Gerade $J_k C$ den Kreis nicht schneiden, sondern nur in C als Tangente berühren. Man trägt also in C an $\overline{J_k C}$ einen rechten Winkel an und findet dadurch den Mittelpunkt C_3 des Kreises der mechanischen Leistung. Für die beliebige Stromstärke $OJ_1 = J_1$ findet man nun die zugehörige mechanische Leistung L_1.

Der zahlenmäßige Wert von L_1 folgt aus der Gleichung:

$$\frac{\mathrm{PS}_1 \,.\, 736}{3\,(W_1 - W_0')} = \frac{3 \cdot L_1}{3 \cdot \overline{J_1 D}},$$

wenn L_1 und die Strecke $\overline{J_1 D}$ in demselben Maßstab gemessen werden zu:

$$\mathrm{PS}_1 = \frac{3 \cdot L_1 (W_1 - W_0')}{\overline{J_1 D} \cdot 736}.$$

Ist die mechanische Leistung bestimmt, dann kann auch der zahlenmäßige Wert des Drehmomentes Z_1 berechnet werden. Es muß sein:

$$75 \cdot Z_1 \cdot \omega = \mathrm{PS}_1,$$

woraus folgt:

$$Z_1 = \frac{\mathrm{PS}_1}{75 \cdot \omega} \text{ in mkg.}$$

Dabei ist $\omega = \frac{2\pi \cdot n_2}{60}$, wenn n_2 die minutliche Umlaufszahl des Läufers ist. Die Tourenzahl wird aus dem Diagramm entnommen von dem Abschnitt σ, welcher der Schlüpfung in Prozenten entspricht, die zu dem Strom J_1 gehört. Die Konstruktion der Schlüpfung erfolgt dadurch, daß durch J_k eine Gerade unter dem Winkel γ gegen $\overline{OC}$ gelegt wird. Die Strecke $\overline{J_1 C}$ schneidet dann das zu dem Strom J_1 gehörige σ auf dieser Geraden ab. Die ganze Länge der Strecke $\overline{J_k \cdot F}$ entspricht einer Schlüpfung von 100%, folglich ist:

$$\sigma = 100 \cdot \frac{\overline{GF}}{\overline{J_k \cdot F}}$$

und es wird die Tourenzahl des Läufers:

$$n_2 = n_1 - \frac{\sigma \cdot n_1}{100},$$

wobei $n_1 = \frac{\nu \cdot 60}{p}$ die synchrone Umlaufszahl ist.

In Fig. 170 sind sämtliche drei Kreise voll aufgezeichnet. Die Werte von W, Z und L über der Geraden OC gelten für die Maschine als **Motor.**

Treibt man den asynchronen Motor von außen an mit übersynchroner Tourenzahl, dann arbeitet er als **asynchroner Generator.** Auch für diesen Fall findet man aus Fig. 170 alle Betriebszustände. Wird er z. B. mit einer Schlüpfung von $\sigma'\%$ über der synchronen Umlaufszahl angetrieben, dann liefert er einen Strom $\overline{OJ_1'} = J_1'$ mit einer Phasenverschiebung φ_1'. Die zuzuführende mechanische Leistung beträgt dann L_1' und die elektrische Arbeit, welche die Maschine als Generator leistet, ist W_1'.

Es gibt also das Heylanddiagramm über jeden Betriebszustand des asynchronen Motors vollständige Auskunft.

In nachstehender Tabelle IV sind mit den Bezeichnungen aus Fig. 170 noch einmal die aus dem Diagramm abzulesenden Werte zusammengestellt.

Tabelle IV.

Ablesbare Werte aus dem Heyland-Diagramm Fig. 170.

	Motor	Generator
Elektrische Leistung in Watt	$3\,W$ zuzuführen	$3\,W'$ abgegeben
Drehmoment	Z abgegeben	Z' zuzuführen
Drehmoment bei Anlauf	Z_0 „	—
Leistung in PS	L „	L' zuzuführen
Größte Leistung in PS	L_{max}	—
Größte elektrische Leistung in Watt	—	W'_{max}
Größte mechanische Leistung in PS, zuzuführen bei W'_{max}	—	L_2'
Der Wirkungsgrad ist	$\eta = \frac{L \cdot 736}{3\,W}$	$\eta = \frac{3\,W}{L' \cdot 736}$

Große Gleichstrommaschinen, welche nur schwierig oder gar nicht bei der Probe vollbelastet werden können, untersucht man vermittels der Kurzschlußkurve und der Leerlaufscharakteristik. Die Aufnahme der Leerlaufscharakteristik (Fig. 112) ist im Sechsten Abschnitt S. 111 und durch die Figuren 111 und 113 erklärt. Die Schaltung für die Aufnahme der Kurzschlußkurve zeigt Fig. 171. Die Magnetwickelung wird durch Fremdstrom erregt und an die Bürsten der Maschine wird ein Amperemeter angeschlossen, der Anker also durch einen möglichst kleinen Widerstand kurzgeschlossen und der Kurzschlußstrom J_k abhängig von der Erregung bestimmt. Der Verlauf der Kurzschlußkurve folgt aus Fig. 172. Da der Widerstand des Ankerstromkreises bei Aufnahme der Kurzschlußkurve nur aus dem Ankerwiderstand und der aus möglichst dicken und kurzen Kabeln mit dem Amperemeter bestehenden Kurzschlußverbindung gebildet wird, so ist offenbar zur Entstehung des normalen Stromes im Anker nur eine sehr geringe *EMK* notwendig, die Maschine arbeitet also in dem unteren geradlinigen Teile der Magnetisierungskurve (Fig. 112) und die Kurzschlußkurve ist ebenfalls eine Gerade. Bei kurzgeschlossenem Anker müssen die Erregeramperewindungen gerade so groß sein, daß die rückwirkenden Ankeramperewindungen aufgehoben werden, weil die ganze induzierte *EMK* im Anker selbst verbraucht wird.

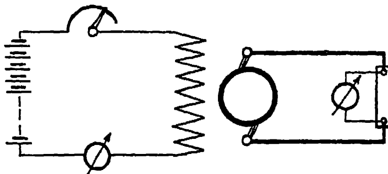


Fig. 171. Schaltung für die Kurzschlußkurve.

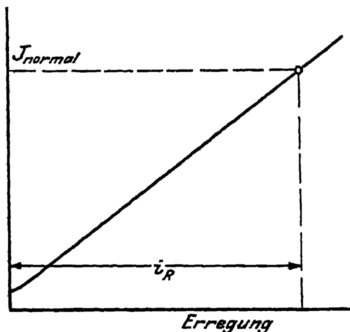


Fig. 172. Kurzschlußkurve einer Gleichstrommaschine.

Bei einer Gleichstrommaschine ist der Verlauf der rückwirkenden Kraftlinien des Ankerfeldes nur abhängig von der Stellung der Bürsten, welche bei neueren Maschinen gewöhnlich als konstant angesehen werden kann. Man kann also aus der Kurzschlußkurve die Erregung i_R, welche bei Kurzschluß den normalen Strom im Anker hervorruft oder wenn

man i_R mit der Windungszahl auf einem Schenkel multipliziert, die zur Aufhebung der Rückwirkung des Ankers erforderlichen Amperewindungen entnehmen. Die Stromstärke i_R aus Fig. 172 läßt sich benutzen zur Untersuchung der Belastungsfähigkeit der Maschine; man kann mit ihr erkennen, ob die Maschine die verlangte Leistung gibt oder nicht.

In Fig. 173 ist die Leerlaufscharakteristik der zu untersuchenden Maschine gezeichnet. Die Gerade OF entspricht dem kleinsten Widerstand im Magnetstromkreis, also dem Schenkelwiderstand ohne irgendwelchen noch vorgeschalteten Reglerwiderstandes. Dieser kleinste Widerstand ist im Magnetstromkreis nur bei der höchsten Belastung vorhanden. Die Gerade OF wird in folgender Weise aufgezeichnet. Bei der größten Belastung der Maschine ist der Widerstand des Reglers kurzgeschlossen und der Magnetstromkreis besteht nur aus dem Widerstand der Schenkelwickelung. Da auf die Magnete die Klemmenspannung $E_{k\,normal}$ der Maschine wirkt, so wird der größte Erregerstrom der Maschine:

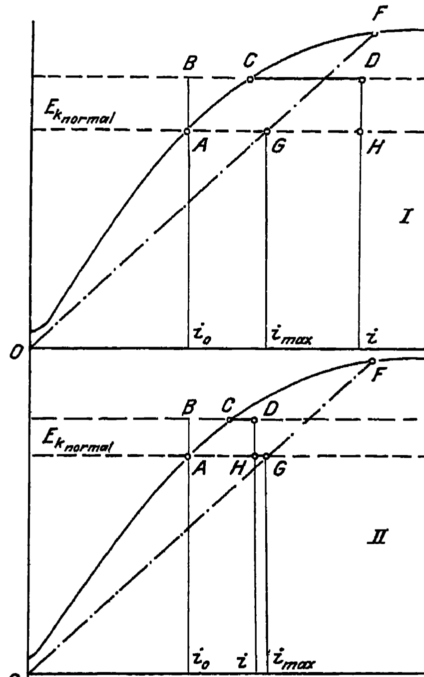


Fig. 173. Indirekte Bestimmung der Belastungsfähigkeit einer Gleichstrommaschine.

$$i_{max} = \frac{E_{k\,normal}}{r_s};$$

dabei ist r_s der Magnetwiderstand der warmen Maschine. Man errichtet also bei i_{max} (Fig. 173) eine Senkrechte, diese schneidet die Gerade für $E_{k\,normal}$ im Punkt G; G mit O verbunden gibt OF. Läuft die Maschine leer, dann liegt die normale Spannung im Punkt A auf der Leerlaufscharakteristik, dazu gehört die Er-

regung i_0. Soll sie mit einem Strom J_{normal} belastet werden, dann muß die im Anker erzeugte EMK zunächst um den Spannungsverlust $J_a \cdot r_a = (J_{normal} + i_{max}) \cdot r_a$ größer sein, man macht also $\overline{AB} = J_a \cdot r_a$ und findet, weil die EMK nur auf der Charakteristik liegen kann, den Punkt C. Von diesem Punkt C aus trägt man die Strecke $\overline{CD}$, welche dem aus der Kurzschlußkurve (Fig. 171) entnommenen Erregerstrom i_R, also der Rückwirkung des Ankerstromes entspricht, nach rechts ab. D ist dann die im Anker zu erzeugende EMK, wenn die Belastungsstromstärke J_{normal} sein soll. Zu D gehört die Erregung i bei der Klemmenspannung $E_{k\,normal}$ (Punkt H). Liegt Punkt H so wie in Fig. 173 I, daß das zugehörige i größer als $i_{k\,normal}$ ist, dann gibt die Maschine die Leistung nicht. Ist aber i kleiner als i_{max} wie in Fig. 173 II, dann läßt sich die Maschine noch etwas überlasten.

Die soeben beschriebene Methode ist allerdings nicht ganz genau. Bei der Aufnahme der Kurzschlußkurve ist die Maschine nur schwach magnetisch gesättigt, während sie im normalen Betriebszustand bei voller Belastung eine höhere Sättigung besitzt. Bei voller Belastung können die rückwirkenden Amperewindungen wegen der höheren Sättigung der Maschinen nicht dieselbe Anzahl Kraftlinien durch die Pole senden als bei Kurzschluß, jedoch ist der Unterschied nicht sehr wesentlich, weil der Luftspalt den größten Widerstand für die Kraftlinien bildet und in diesem die Kraftlinienzahl unabhängig von der Sättigung direkt proportional mit den erregenden Amperewindungen ist. Die in Fig. 173 gegebene Methode ist also ganz gut brauchbar, weil noch etwas Sicherheit dabei ist, denn da wir die Strecke $\overline{CD} = i_R$ auftragen, also eine Strecke proportional den rückwirkenden Ankeramperewindungen, während eigentlich, wie vorhin bemerkt, eine den etwas geringeren Rückwirkungskraftlinien proportionale Strecke aufzutragen wäre, so gibt die Maschine unter allen Umständen die Leistung, wenn i_{max} größer oder gleich i ist.

Bei **Wechsel- und Drehstromgeneratoren** kann man nicht so verfahren wie bei Gleichstrom, weil bei diesen Maschinen die Ankerrückwirkung von der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung abhängt. Das Maximum der EMK entsteht in der Spule einer Wechselstrommaschine, wenn ihre Spulenseiten mitten vor einem Pol vorbeikommen, der größte Wert des Stromes, den

diese *EMK* hervorruft, entsteht aber bei induktiver Belastung erst später. Daraus ergibt sich, daß bei ein und derselben Stromstärke dann die Rückwirkung am kleinsten ist, wenn $\cos \varphi = 1$, also keine Phasenverschiebung vorhanden ist und am größten, wenn $\cos \varphi = 0$, also 90^0 Phasenverschiebung ist, denn im letzten Fall hat der Strom in der Spule sein Maximum, wenn diese mit beiden Spulenseiten zwischen je zwei Polen steht; die durch den Strom erzeugten Rückwirkungslinien finden dann den geringsten Luftwiderstand. Man würde also, wenn man die Rückwirkung wie bei Gleichstrom aus der Kurzschlußkurve entnimmt, einen viel zu hohen Wert erhalten, denn bei Kurzschluß ist die Phasenverschiebung sehr nahezu 90^0.

Die nachstehende Methode folgt der Anschauung von Arnold (Beitrag zur Vorausberechnung und Untersuchung von Ein- und Mehrphasengeneratoren von Arnold und J. L. la Cour, Verlag von Enke, Stuttgart). Es sei in Fig. 174 die Strecke OJ die Richtung der Stromstärke, OE_k die Größe und Richtung der Klemmenspannung, welche um den Winkel φ bei induktiver Belastung gegen die Stromstärke verschoben ist. (Meist ist $\cos \varphi = 0{,}8$ bei Wechselstrommaschinen.) Parallel mit OJ trägt man den Spannungsverlust $J \cdot r_a$ auf, wobei r_a der Widerstand ist, und zwar bei Sternschaltung der Widerstand von zwei Phasen hintereinander, $r_a = \sqrt{3} \cdot r_p$ (ebenso ist bei Sternschaltung für sämtliche Spannungen und Spannungsverluste die verkettete Spannung zu nehmen, welche in den angegebenen Schaltungen auch gleich gemessen wird). Dann trägt man, wie Fig. 174 zeigt, E_{s_1} und E_{s_r} ab, wenn E_{s_1} die Reaktanzspannung des Ankers ist und E_{s_r} die aus Gegenwindungen E_{s_2} und Querwindungen E_{s_3} resultierende Rückwirkung als Spannung ausdrückt. E_{s_1} und E_{s_r} stehen beide senkrecht auf J. Man findet in OE die Größe und Richtung der im Anker zu induzierenden *EMK*. Aus der Leerlaufscharakteristik der Maschine ergibt sich, wie groß die Erregerstromstärke für

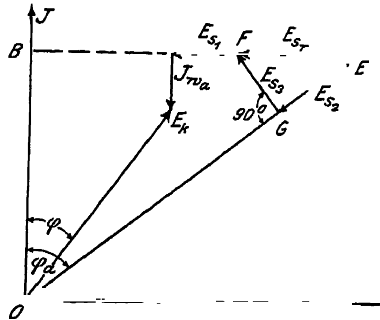


Fig. 174. Belastungsfähigkeit von Wechselstrommaschinen.

diese $EMK = OE$ sein muß. Ist sie kleiner als die größte erreichbare, dann ist die Maschine noch etwas überlastbar, ist sie aber größer als die größte Erregung, dann gibt die Maschine die Leistung nicht.

Es sind nun die in Fig. 174 benutzten Größen E_{s_1} und E_{s_r} zu ermitteln. In Fig. 175 sei x_{s_1} die Reaktanz der Maschine und r'_a die Impedanz oder der scheinbare Widerstand, r_a der Ohmsche Widerstand. Die Bestimmung von x_{s_1} und r'_a ist schwierig, denn auch die Reaktanz hängt von der Stärke des Ankerkraftflusses ab, also von der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung im Anker und von der den Kraftfluß erzeugenden mittleren Amperewindungszahl des Ankers. Da aber der Rückwirkungskraftfluß des Ankers nicht so beträchtlich ist, die Sättigung, die er herbeiführt, also schwach und da außerdem ein Luftweg für den Kraftfluß vorhanden ist, so ist mit genügender Genauigkeit der erzeugte Kraftfluß des Ankers proportional dem Ankerstrom und es ist nur darauf zu achten, daß die Ankerspulen richtig der

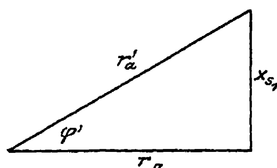


Fig. 175. Widerstandsdreieck bei Wechselstrom.

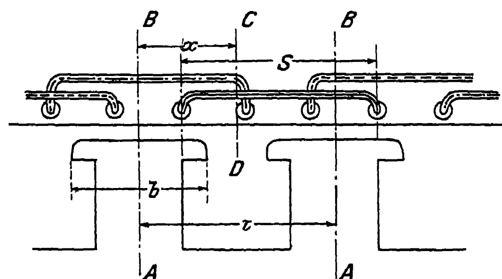


Fig. 176. Spulenstellung an den Polen bei Messung von x_{s_1} und r'_a.

Phasenverschiebung entsprechend unter den Polen stehen. In Fig. 176 ist AB die Mittellinie des Poles. Die induzierte EMK der Spule S hat ihr Maximum, wenn $x = \frac{\tau}{2}$ ist, also Spule S so steht, daß ihre Mitte mit CD zusammenfällt. Die Stromstärke erreicht aber erst dann ihr Maximum, wenn die Spule sich um ein Stück φ, entsprechend der Phasenverschiebung, weiter bewegt

hat. Es muß also die Spule S bei der Messung von x_{s_1} so gegenüber dem Pol stehen, daß $x = \frac{\tau}{2} + l_\varphi$ wird; da τ einer Welle, also 180°, entspricht, so wird

$$\frac{\tau}{l_\varphi} = \frac{180}{\varphi} \text{ und } l_\varphi = \frac{\tau \cdot \varphi}{190},$$

also

$$x = \frac{\tau}{2} + \frac{\tau \cdot \varphi}{180} = \tau\left(\frac{1}{2} + \frac{\varphi}{180}\right).$$

Die Messung von x_{s_1} und r'_a ergibt sich aus dem Schema der Fig. 177. Eine kleine Wechselstrommaschine arbeitet auf zwei hintereinander geschaltete Phasen der zu untersuchenden Drehstrommaschine; W ist ein Wattmeter, e ein Volt- und i ein Amperemeter. Bei der Messung ist die Wickelung des Magnetfeldes der Drehstrommaschine kurz zu schließen. Dann ist (siehe auch Fig. 175)

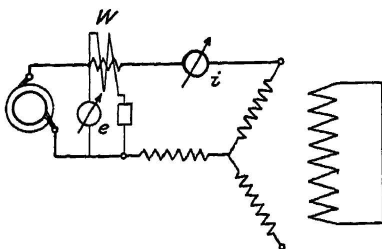


Fig. 177. Messung von x_{s_1} und r'_a.

$$r'_a = \frac{e}{i}$$

und $$\cos\varphi' = \frac{W}{e \cdot i},$$

also $$x_{s_1} = r'_a \cdot \sin\varphi'$$

und $$E_{s_1} = J \cdot x_{s_1}.$$

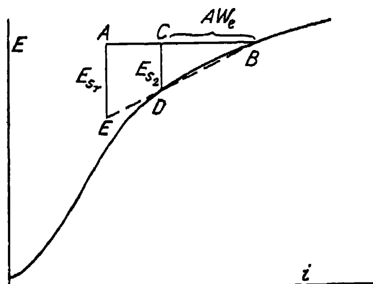


Fig. 178. Bestimmung von E_{s_r}.

Außer E_{s_1} ist nun noch E_{r_s} zu bestimmen. E_{s_r} ergibt sich aus Fig. 178; B sei die normale EMK. Da der Spannungsabfall niemals sehr groß ist, kann man für die EMK die Klemmenspannung setzen. Man trägt von B aus nach links die Rückwirkungsamperewindungen AW ab, berechnet AW_e nach der Gleichung:

$$AW_e = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot m \cdot f_{w_1} \cdot \frac{\sin\left(\frac{b}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{b}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}} \cdot J \cdot n \cdot \sin\varphi_a.$$

Hierbei ist φ_a die Phasenverschiebung zwischen induzierter *EMK* und Stromstärke; da aber φ_a nicht bekannt ist, kann man annähernd setzen: $\varphi_a \sim \varphi$; m ist die Phasenzahl, b und τ ergeben sich aus Fig. 176. (Da sie nur als Verhältnis $\frac{b}{\tau}$ vorkommen, ist es gleichgültig, in welchem Maße sie gemessen werden, es muß nur beide Male dasselbe gewählt werden.) n ist die Windungszahl und f_{w_1} der Wickelungsfaktor, welcher aus nachstehender Tabelle V entnommen werden kann.

Tabelle V.

Wickelungsfaktoren von Wechselstrommaschinen.

	Lochwickelungen			Verteilte Wickelungen			
Anzahl Löcher pro Pol und Phase . . . . . . $q =$	2	3	4	$\frac{S}{\tau} = \frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	1
Ein- u. Zweiphasengeneratoren mit $2\,q$ Löchern pro Pol $f_{w_1} =$	0,923	0,91	0,906	—	0,901	—	0,636
Ein- u. Dreiphasengeneratoren mit $3\,q$ Löchern pro Pol $f_{w_1} =$	0,966	0,96	0,958	0,956	—	0,830	0,636

Es ist nun:

$$\frac{E_{s_2}}{E_{s_r}} = \sin \varphi_a \sim \sin \varphi,$$

wie aus Fig. 174 folgt, weil $\triangle\, OBE$ ähnlich $\triangle\, FGE$ ist. (In Fig. 174 sind E_{s_1} und E_{s_r} im Verhältnis zu der Klemmenspannung E_k zu groß, um die Konstruktion klar zu zeigen, φ_a ist also in Wirklichkeit weniger von φ verschieden als in Fig. 174.) Aus Fig. 178 folgt weiter, wenn

$$AB = \frac{CB}{\sin \varphi} = \frac{AW_e}{\sin \varphi}$$

gemacht wird, daß dann auch die Proportion gilt:

$$\frac{CB}{AB} = \frac{CD}{AE}$$

und weil CD den Gegenwindungen entspricht, im Maßstab des Spannungsabfalles also E_{s_2}, so ist:

$$\frac{CB}{AB} = \frac{AW_e}{\frac{AW_e}{\sin \varphi}} = \frac{CD}{AE} = \frac{E_{s_2}}{E_{s_r}} = \sin \varphi.$$

Zu allen indirekten Methoden über die Belastungsfähigkeit muß unbedingt noch ein Versuch über die bei Vollast auftretende Temperaturerhöhung der Maschine hinzugefügt werden (s. S. 174), andernfalls kann man falsche Schlüsse bezüglich der Belastungsfähigkeit ziehen, weil viele Maschinen für vorübergehende Überlastung eingerichtet sind, die sie dann aber nur für kurze Zeit aushalten können, was man aus den Aufnahmen über die Belastungsfähigkeit nicht erkennen kann.

Künstliche Erwärmung großer Wechselstrommaschinen.

Sehr einfach läßt sich die Erwärmung großer Wechselstrommaschinen feststellen, ohne daß sie belastet werden, wenn man sie nach der von Goldschmidt, ETZ 1901, Heft 34 gegebenen Weise bei ihrem normalen Felde künstlich mit Gleichstrom erwärmt.

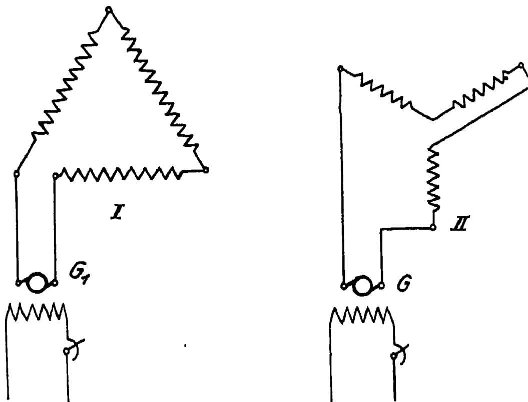


Fig. 179. Künstliche Erwärmung von Wechselstrommaschinen mit Gleichstrom.

In Fig. 179 sind G und G_1 Gleichstromgeneratoren, welche die normale Stromstärke der Wechselstrommaschine in Form von Gleichstrom abgeben können. Das Feld der Wechselstrommaschine ist normal erregt und die Maschine wird von außen mit normaler Tourenzahl angetrieben. Es muß dann die Ankerwickelung so geschaltet werden, daß sich die durch die Drehung im Anker induzierten Wechselstromspannungen aufheben.

Bei Dreiphasengeneratoren geschieht dieses je nachdem, ob Dreiecks- oder Sternschaltung vorhanden ist, nach Fig. 179 *I* oder *II*. Bei einphasigen Maschinen ist es nur möglich, wenn die Wickelung auf Spulen verteilt ist, die nach Fig. 180 gegeneinander zu schalten sind. Das normal erregte Magnetsystem ruft in den Maschinen die normalen, durch das Feld bedingten Verluste Ummagnetisierung und Wirbelströme im Eisen hervor, und außerdem wird die Stromwärme durch Gleichstrom erzeugt. Es wird also die Maschine, ohne daß sie belastet wird, ihre bei

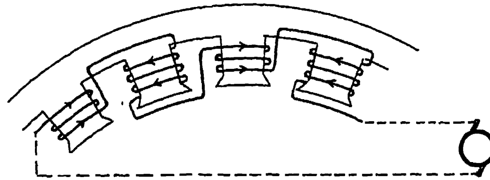


Fig. 180. Gegeneinanderschalten der Spulen bei Einphasenmaschinen zur künstlichen Erwärmung mit Gleichstrom.

Vollast auftretende Wärme entwickeln, wenn man sie genügend lange laufen läßt (wenigstens 6 Stunden). Unbequem sind bei Wechselstrommaschinen für niedrige Spannung oder bei sehr großen Maschinen die hohen Stromstärken und die kleinen Widerstände der Ankerwickelungen. Die Spannung der Gleichstrommaschine muß dann sehr niedrig sein und man erregt sie daher fremd, wie bei der Kurzschlußkurve (Fig. 171), so stark, bis der dem normalen Strom der Wechselstrommaschine entsprechende Gleichstrom durch die Ankerwickelung der Versuchsmaschine fließt.

Bestimmung der Temperaturerhöhung von Maschinen.

Die Bestimmung der Temperaturerhöhung der Maschinen ist außerordentlich wichtig, denn sie ist maßgebend für deren Leistungsfähigkeit. Kann man die Maschine zur Untersuchung direkt belasten, dann entwickelt sich gleichzeitig auch ihre Temperatur in normaler Weise. Bestimmt man aber die Belastungsfähigkeit indirekt, dann muß die Temperaturerhöhung, die bei Vollast auftreten würde, unbedingt noch besonders bestimmt werden, denn es ist möglich, daß die vorhin gegebenen Methoden zur indirekten

Bestimmung der Belastungsfähigkeit den Schluß zulassen, daß sich die Maschine in der verlangten Weise belasten läßt, in Wirklichkeit würde sie aber dabei so warm werden können, daß ihre Isoliermittel in kurzer Zeit zerstört würden.

Bei jeder Maschine treten Temperaturerhöhungen auf in der Magnetwickelung, am Kollektor und im Anker.

Die Temperatur des Kollektors wird nach dem Stillsetzen der belastet gewesenen Maschine genau wie beim Anker mit einem Thermometer gemessen. Die Temperatur der Magnete läßt sich überhaupt nicht genau bestimmen, wie folgende Überlegung zeigt. Die Magnetwickelung besteht aus vielen aufeinander gewickelten Lagen Drahtes und die Wärme in ihnen ist hauptsächlich Stromwärme, abgesehen von den geringen Wirbelströmen, die durch das Hin- und Herpendeln der Kraftlinien in den Polschuhen bei Nutenankern entstehen und bei einphasigen Wechselstrommaschinen durch die Schwankungen des Rückwirkungsfeldes des Ankers erzeugt werden. Würde man mit einem Thermometer die äußere Temperatur der Magnetspulen messen, dann erhielte man zu niedrige Werte, weil die Temperatur im Inneren der Spulen viel höher ist. Man bestimmt nun die Temperaturzunahme der Magnetspulen durch Messung ihrer Widerstandszunahme, indem man einmal den Widerstand r_{s_1} der Magnete (siehe dritter Abschnitt) vor der Belastung und darauf sogleich nach dem Stillsetzen der Maschine zum Schluß der Belastungsprobe bestimmt, wobei er r_{s_2} betragen möge. Kennt man außerdem (siehe ebenfalls Abschnitt III) den Temperaturkoeffizienten α, dann ist nach Formel (21) S. 80 die Temperaturzunahme:

$$T = t_2 - t_1 = \frac{\left(\frac{r_{s_2}}{r_{s_1}} - 1\right) \cdot 100}{\alpha} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (44)$$

Die auf diese Weise bestimmte Temperaturerhöhung ist aber auch nur die mittlere Temperaturerhöhung der ganzen Spule, sie ist zwar höher als die außen herrschende Oberflächentemperatur, aber sie weicht nach genaueren Untersuchungen häufig um 20% von der höchsten Temperatur im Innern der Spule ab. Diese Umstände sind allerdings bei den vom Verband deutscher Elektrotechniker als zulässig angegebenen Temperaturzunahmen (siehe Tabelle VI) berücksichtigt insofern, als diese Werte genügend niedrig gewählt sind, so daß die Isolierung bei den dort angegebenen Werten vor Schaden bewahrt ist.

Der oben angegebene Unterschied von 20% zwischen der mittleren gemessenen und der im Inneren vorhandenen Temperaturerhöhung hängt natürlich sehr stark von der Form der Spule ab. Ist diese, wie es heute häufig geschieht, mit Lüftungskanälen versehen, dann ist der obige Unterschied wesentlich geringer als 20%.

Beim Anker wird die Wärme hauptsächlich durch die Ummagnetisierungsarbeit und die Wirbelstromverluste hervorgerufen, also hauptsächlich durch das Feld, weniger durch Stromwärme. Da aber das Feld nach dem Ankerumfang zu dichter ist, als nach der Welle zu, und gerade in den Zähnen höhere Sättigungen vorkommen, so folgt daraus, daß die Temperatur des Ankers auf seiner Oberfläche am höchsten ist, zumal auch die dritte Wärmequelle, die Drähte, am Umfang in den Nuten liegen. Man kann demnach die Temperatur des Ankers nach dessen Stillsetzen mit dem Thermometer bestimmen. Dieses legt man zu dem Zweck auf einen Zahn, also auf das Eisen und nicht auf eine Nut, weil Metall die Wärme besser leitet, umwickelt es außerdem noch an seinem unteren Ende mit Stanniol und deckt es mit Putzwolle gut zu.

Folgende Tabelle VI gibt die zulässigen Übertemperaturen bei einer höchsten Lufttemperatur von 35° an.

Tabelle VI.

Zulässige Übertemperatur bei einer höchsten Lufttemperatur von 35° nach den Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker.

Bei Wickelungen, Kollektoren und Schleifringen	Übertemperatur T	Bemerkungen
Mit Baumwollisolierung .	50°	Die höchste Lufttemperatur darf 35° nicht überschreiten.
Mit Papierisolierung . .	60°	Die Maschinen müssen vor der Messung wenigstens 6 Stunden mit Vollast gelaufen sein.
Mit Glimmer und Asbest	80°.	

Bei sehr großen Wechsel- und Drehstromgeneratoren, die bei der Probe nicht voll belastet werden können, wendet man die vorhin erläuterte künstliche Erwärmung an. Bei solchen großen

Wechselstrom- und Gleichstrommaschinen, die sich künstlich nicht erwärmen lassen, kann man die Temperaturzunahme des Ankers trotzdem nach folgender Art bestimmen. Wenn man einem Körper Wärme zuführt, dann steigt zunächst seine Temperatur schnell, dann aber langsam und schließlich bleibt sie auf einer bestimmten, von der zugeführten Wärmemenge abhängigen Höhe konstant. Für den Zustand konstanter oder stationärer Temperatur gilt die Gleichung:

Entwickelte Wärme = abgegebene Wärme.

Die entwickelte Wärme Q_e wird durch die Verluste in der Maschine abzüglich der Reibung dargestellt, denn es setzen sich im Anker in Wärme um die Wirbelströme, die Ummagnetisierungsarbeit und die Stromwärme. Bezeichnen wir die für Wirbelströme verbrauchten Watt mit W_w, die für Ummagnetisierung mit W_h und ist J_a der Strom im Anker, r_a dessen Ohmscher Widerstand, so wird die entwickelte Wärmemenge:

$$Q_e = W_w + W_h + J_a^2 \cdot r_a.$$

Die Watt W_w und W_h werden nach den im Abschnitt VIII gegebenen Methoden bestimmt.

Die abgegebene Wärme Q_a hängt ab von der Konstruktion der Maschine (abkühlende Oberfläche), von der Umdrehungszahl und der Übertemperatur T über die Umgebung der Maschine. Für konstante normale Umdrehungszahl wird sie:

$$Q_a = C \cdot T,$$

wobei C eine Konstante ist, in welcher Umdrehungszahl und Konstruktionseigenschaften der Maschine enthalten sind.

Für stationäre Temperatur gilt:

$$Q_e = Q_a.$$

Hieraus folgt die Bestimmung von C. Man läßt die Maschine als Motor so lange leer laufen, und erregt sie so, daß sie ihre normale Umdrehungszahl macht, bis ihre Temperatur konstant geworden ist. Darauf setzt man still und bestimmt die Übertemperatur T_0 des Ankers mit dem Thermometer in der gewöhnlichen Weise. Hat man von der Maschine durch eine Leerlaufsuntersuchung nach Abschnitt VIII die Verluste W_w und W_h bei der normalen Umdrehungszahl bestimmt, so wird:

$$C = \frac{0{,}24\,(W_w + W\ )}{T_0}.$$

Die wirkliche Übertemperatur der Maschine bei normaler Belastung wird dann:

$$T = \frac{0{,}24\,(W_w + W_h + J_a^2 \cdot r_a)}{C} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (45)$$

Hat man nicht die Leerlaufsarbeit der Maschine bestimmt, so kann man annähernd auch so verfahren, daß man die bei der normalen Umdrehungszahl der als Motor laufenden Maschine zuzuführenden Watt W_0 bestimmt und darauf die Übertemperatur T_0 des Ankers mit dem Thermometer mißt. Es wird dann annähernd

$$C = \frac{0{,}24 \cdot W_0}{T_0}$$

und der Wert von C wird etwas zu groß, weil in W_0 die Reibung mitenthalten ist. Infolgedessen würde die berechnete Übertemperatur für volle Belastung etwas zu klein werden, nämlich:

$$T = \frac{0{,}24\,(W_0 + J_a^2 \cdot r_a)}{C}. \quad .$$

Bestimmung von Drehmomenten.

Das Drehmoment einer mechanischen Arbeit in der Sekunde ergibt sich, wie schon S. 137 erwähnt ist, aus der Beziehung:

$$N = \frac{\text{Drehmoment} \cdot 2\pi \cdot n}{60 \cdot 65}.$$

Bei elektrischen Generatoren ist dann N die in der Sekunde zugeführte mechanische Arbeit in Pferdestärken.

Bei Generatoren, welche mit Riemenscheiben versehen sind, läßt sich die zugeführte mechanische Leistung bestimmen durch Messung der Riemenspannung.

Ist d der Durchmesser der Riemenscheibe in m, P die durch den Riemen übertragene Umfangskraft in kg, dann ist das Drehmoment:

$$D = \frac{d}{2} \cdot P \text{ in mkg.}$$

Folglich wird:

$$N = \frac{D \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 75} = \frac{d \cdot P \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 75} \text{ in PS} \quad . \quad . \quad . \quad (46)$$

Die Riemenspannung P kann durch nachstehende Apparate und Methoden gemessen werden.

Einer der ältesten hierzu geeigneten Apparate ist das **Riemendynamometer** nach v. Hefner-Alteneck in Fig. 181. Der mit Pfeilen bezeichnete Riemen ist der treibende Riemen, in diesem herrscht die stärkere Spannung S_1, während die Spannung S_2 im ablaufenden Riemen schwächer ist. Bekanntlich ist

$$P = S_1 - S_2$$

und die Rolle R wird infolgedessen nach oben gedrückt, weil der Hebel H sich um Punkt A drehen kann. Durch Spannen der Feder F vermittels der Kurbel K wird der Hebel H wieder in seine Mittelstellung geführt, welche erreicht ist, wenn der Zeiger Z_1 vor der Marke m spielt. Der Zeiger Z_2 zeigt dann direkt die Riemenspannung P in kg an.

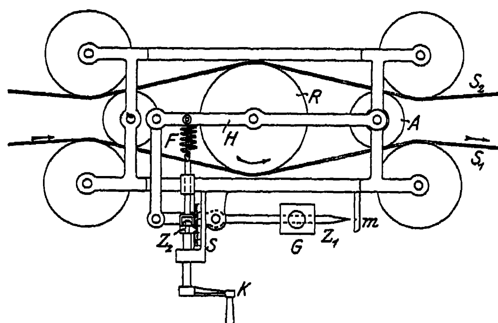


Fig. 181. Riemendynamometer nach v. Hefner-Alteneck.

Die Eichung des Dynamometers geschieht dadurch, daß man an Stelle des Riemens S_1 ein Riemenstück einlegt, welches am einen Ende befestigt ist, während das andere Ende durch Gewichte belastet werden kann. Läßt man denjenigen Teil des Rahmens frei, in welchem der Riemen S_2 sonst läuft, dann ist die zur Herstellung des Gleichgewichtes des Hebels H erforderliche Spannung der Feder F, welche an Z_2 abgelesen wird, gleich den Gewichten, mit denen man das Ende des Riemenstückes S_1 belastet hat. Vor dem Versuch ist natürlich der Zeiger Z_2 auf den Nullpunkt der Skala S zu drehen, dann muß der Zeiger Z_1 vor der Marke m spielen; falls dies nicht zutrifft, muß man durch Verschieben des Gegengewichtes G den Hebel richtig einstellen.

Der Rahmen des v. Hefner-Alteneckschen Riemendynamometers kann an einem Holzgerüst befestigt werden, welches am Boden festgeschraubt wird.

Bei dem **Dynamometer** von Ganz & Co., welches Fig. 182 zeigt, sind zwei Riemen nötig. Von der antreibenden Maschine führt ein Riemen zur Scheibe R_1, von der Scheibe R_2 ein zweiter Riemen zu der angetriebenen Maschine, also dem elektrischen Generator. Die Kegelräder Z_2 sind mit den Scheiben R_1 und R_2 fest verbunden; im übrigen sitzen aber sämtliche Räder lose auf ihren Wellen, nur gegen seitliche Verschiebung gesichert. Bei der eingezeichneten Drehrichtung würde sich die Gewichtsschale bei P_1 heben, wenn sie unbelastet wäre. Sie muß durch Gewichte P_1 so lange belastet werden, bis sie nicht mehr mitgenommen wird, dann überträgt sich die Drehung der Scheibe R_1 durch die Kegel-

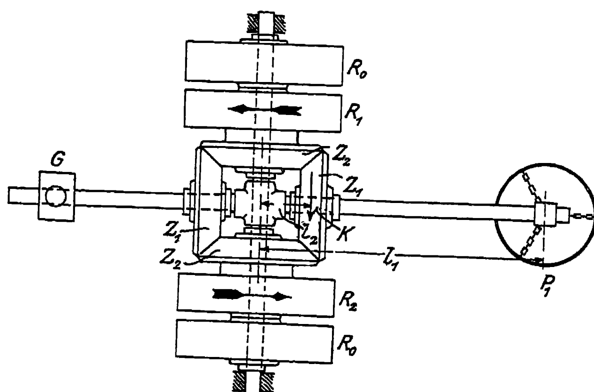


Fig. 182. Dynamometer von Ganz & Co.

räder auf die Scheibe R_2, und der Riemenzug ist gleich dem Zahndruck K, also:

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{K} = \boldsymbol{P}_1 \cdot \frac{l_1}{l_2} \text{ in kg} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (47)$$

Das Dynamometer muß, damit die Leergangsarbeit (Reibung der Zahnräder und der Scheiben) nicht mitgemessen wird, durch das Gegengewicht G ausgeglichen werden, indem man die Scheibe R_1 mit der betreffenden Tourenzahl antreibt, während der Riemen von R_2 auf die nebenliegende Leerscheibe R_0 gelegt ist.

Ein anderer vielfach benutzter Apparat ist das **Dynamometer** von Fischinger in Fig. 183. Auch hier sind zwei gesonderte Riemen nötig, von denen der eine die Scheibe S_1 mit der Antriebsmaschine verbindet, während der zweite von der Scheibe S_2 zum elektrischen

Generator führt. Es sei zunächst die Gewichtsschale bei P_1 zu leicht, dann wird die Scheibe S_1 sich gegen die Scheibe S_2 im Sinne der Drehung vorwärts verschieben, dadurch wird der Hebel *h*, die mit ihm fest verbundene Stange *a* und der Arm *b* in dem gezeichneten Sinne verdreht, diese Drehung durch den Winkelhebel *w* auf die Stange S_3 übertragen, so daß diese auf die Druckschraube des Zeigers *Z* drückt und dieser einen Ausschlag anzeigt. Wenn man bei P_1 so stark durch Aufsetzen von Gewichten belastet hat, bis der Zeiger *Z* auf Null spielt, ist die Verdrehung der Scheibe S_1 gegen S_2 aufgehoben durch das Moment

$$P_1 \cdot l_1 = K \cdot l_2.$$

Da aber $l_1 : l_2 = 10 : 1$ ausgeführt ist, so wird der Riemenzug

$$\boldsymbol{P = K = 10 \cdot P_1} \textbf{ in kg} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (48)$$

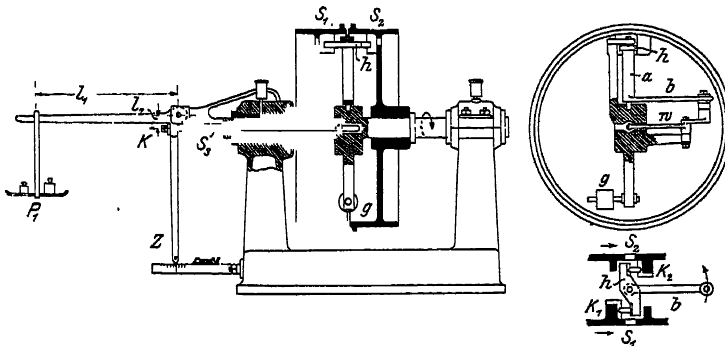


Fig. 183. Dynamometer von Fischinger.

Dabei ist aber die Leergangsarbeit des Dynamometers mit gemessen, welche abgezogen werden muß und auch hier dadurch bestimmt wird, daß man den Riemen von S_2 abwirft und durch Belastung bei P_1 Gleichgewicht herstellt, indem S_1 mit der normalen Umlaufszahl angetrieben wird.

Mit dem kleinen Gegengewicht *g* wird das Arm- und Hebelsystem, welches an der Drehung mit teilnimmt, so ausgeglichen, daß sein Schwerpunkt in der Mitte der Welle liegt.

Bei kleinen Riemenmaschinen kann man den **Riemenzug** auch **durch Wägung** bestimmen, und zwar in genau derselben Weise bei Motoren, wie bei Generatoren für Gleich- und Wechselstrom.

Man stellt die auf einem eisernen Gerüst befestigte Maschine so auf eine Schneide A, wie Fig. 184 zeigt, daß die Wellenmitten der treibenden und der getriebenen Maschine mit der Schneide A auf einer senkrechten Geraden liegen. Dann sind die Hebelarme der beiden Riemenspannungen S_1 und S_2 einander gleich (r) und das Gewicht G der Maschine ist aufgehoben.

Nachdem man durch ein Gegengewicht Q bei stillstehender Maschine den Wagebalken mit Gewichtsschale ausgeglichen hat, setzt man die Maschine in Betrieb. Dadurch werden die Spannungen S_1 und S_2 ungleich, und zwar wird die Spannung im ziehenden Riemenstück größer (in Fig. 184 also $S_1 > S_2$) und es muß

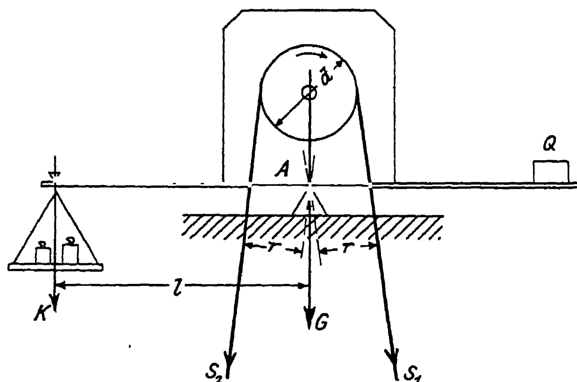


Fig. 184. Bestimmung des Riemenzuges durch Wägung.

durch Aufsetzen von Gewichten K das gestörte Gleichgewicht wieder hergestellt werden. Ist dies erreicht, dann gilt:

$$S_1 \cdot r - S_2 \cdot r - K \cdot l = 0$$

oder

$$S_1 - S_2 = P = \frac{K \cdot l}{r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (49)$$

Ein besonderer Fall ist in Fig. 185 dargestellt. Dort ist ein Motor mit Vorgelege gezeichnet, dessen Gewicht G dann in bezug auf Punkt A ein Drehmoment ausübt. Es muß deshalb die Vorrichtung vor der Messung durch Aufsetzen von Gewichten auf die Dezimalwage, welche hier wegen des Maschinengewichtes zu verwenden ist, ins Gleichgewicht gebracht werden. Der Gegendruck der Wage sei daher K_0 und es ist

$$G \cdot x = K_0 \cdot l \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (X)$$

Wird der Motor eingeschaltet, dann müssen die Gewichte auf der Dezimalwage vermehrt werden und es sei jetzt bei einem Gegendruck K_1 der Wage Gleichgewicht vorhanden.

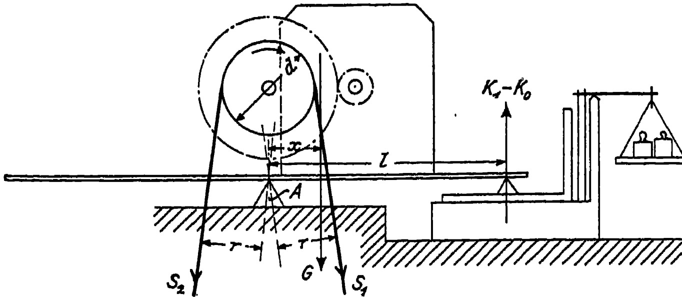


Fig. 185. Bestimmung des Riemenzuges durch Wägung bei einem Motor mit Vorgelege.

Es gilt dann für den Betriebszustand des Motors die Gleichung:

$$S_1 \cdot r - S_2 \cdot r - K \cdot l + G \cdot x = 0,$$

setzt man aus der Gleichung (X) den Wert für $G \cdot x$ ein, dann erhält man

$$(S_1 - S_2) \cdot r = (K_1 - K_0) \cdot l$$

und

$$S_1 - S_2 = P = \frac{(K_1 = K_0) \cdot l}{r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (50)$$

Einige allgemeine Bemerkungen mögen noch hinzugefügt werden. Damit der Riemenzug die hochgestellte Maschine nicht herunterzieht, muß diese vor und hinter der Scheibe unterstützt werden. Die Schneide A, welche aus Gußeisen hergestellt werden kann und selbstverständlich für mehrere Modelle von Maschinen passend gemacht wird, liegt nach Fig. 186 auf einem Holzgerüst C. Damit beim Schwanken der Vorrichtung die Bewegung des Hebels T eng begrenzt ist, schiebt man die Böcke B unter. Die zu untersuchende Maschine wird auf ein Gerüst aus Profileisen befestigt, und zwar vermittels Laschen und Bolzen an dem Winkeleisen W_3 und dem Träger T. Das Gerüst ruht am besten nur auf zwei Stellen der Schneide A. In Fig. 186 liegt diese in den Kerben von W_3 und W_2, während, wie die obere Figur zeigt, vom Steg des Trägers so viel weggenommen ist, daß dieser nicht mehr mit aufliegt.

Die Methoden, den Riemenzug durch Wägung zu bestimmen, eignen sich nur für kleinere und mittelgroße Maschinen, weil die zu untersuchende Maschine hochgestellt werden muß, was aber in

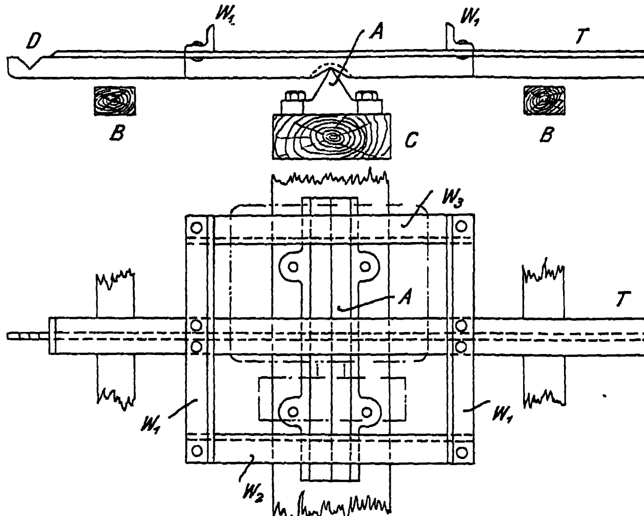


Fig. 186. Gerüst zur Bestimmung des Riemenzuges durch Wägung.

Laboratorien und auf Prüffeldern von Fabriken keine Schwierigkeiten macht.

Bremsdynamometer zur Bestimmung des Drehmomentes und der mechanischen Leistung von Motoren.

Die Bremsdynamometer beruhen sämtlich auf der Umsetzung der mechanischen Arbeit in Wärme. Der einfachste Apparat dieser Art ist der Pronysche **Zaum.** Er besteht, wie aus Fig. 187 hervorgeht, aus den beiden Bremsbacken B, welche durch Schrauben auf die Bremsscheibe (gewöhnlich gleich die Riemenscheibe) gepreßt werden können. Will man die Maschine belasten, so stellt man bei Q Gewichte auf und regelt die Pressung der Bremsklötze derartig mit dem Handrad, daß der Zaum im Gleichgewicht bleibt. Würde man die Pressung zu stark ausführen, dann würde infolge der Reibung zwischen Bremsscheibe und Bremsklötzen der ganze Zaum im Sinne der Drehung mitgenommen, bei zu schwacher

Pressung würde Q nicht gehoben werden. Ist dagegen die Pressung richtig, dann hält das Moment $Q \cdot l$ gerade der an den Bremsklötzen auftretenden Reibung das Gleichgewicht. Durch diese

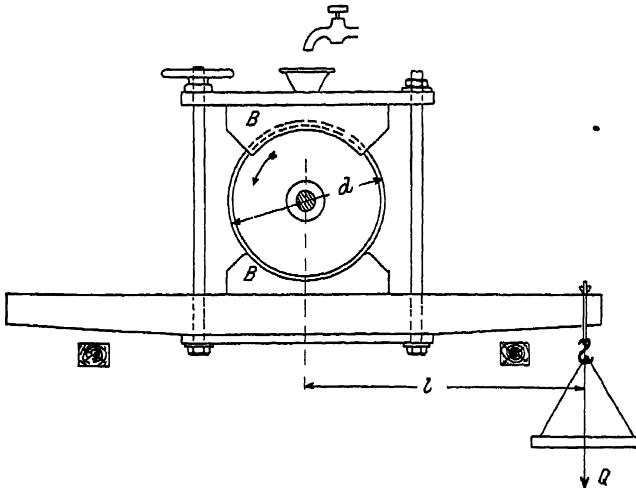


Fig. 187. Bremszaum von Prony.

Reibung wird die Arbeit der Maschine in Wärme umgesetzt. Es gilt deshalb für das Drehmoment D der Maschine die Gleichung:

$$D = Q \cdot l \text{ in mkg (also Q in kg und } l \text{ in m)} \quad . \quad . \quad (51)$$

Die Leistung der Maschine ist dann:

$$N = \frac{Q \cdot l \cdot n \cdot 2\pi}{60 \cdot 75} \text{ in PS} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (52)$$

Dadurch, daß man die aufgesetzten Gewichte Q immer weiter vermehrt und dementsprechend den Bremsdruck verstärkt, kann man die Maschine immer stärker belasten.

Bei größeren Bremszäumen muß wegen der durch die Reibung sich entwickelnden Hitze Wasserkühlung angewendet werden, was namentlich bei Elektromotoren durch Umherspritzen und Verdampfen des Wassers unangenehm ist. Dann hat der gewöhnliche Pronysche Zaum den Übelstand, daß die Reibung nicht immer konstant ist, der Zaum deshalb selten ganz ruhig steht und gewöhnlich stark schwankt, indem er bald mitgenommen wird, bald wieder zurückbleibt.

Das Mitnehmen verhindert man durch **selbstregelnde Bremsen** nach Brauer. Eine solche Bremse zeigt Fig. 188, dort ist gleichzeitig die Benutzung einer Dezimalwage bei der Bremsung gezeigt.

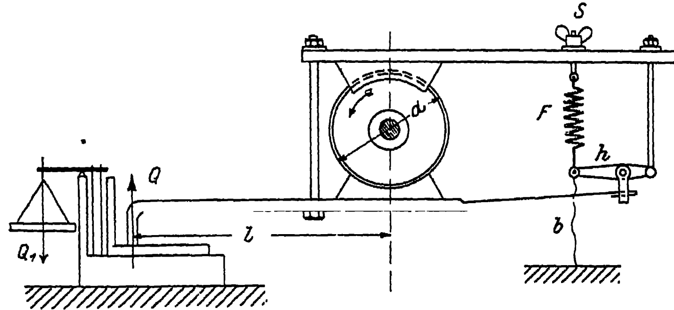


Fig. 188. Selbstregelnde Bremse nach Brauer.

Durch Verstellen der Flügelschraube S wird der nötige Druck der Bremsbacken hervorgerufen. Wird der Zaum infolge zu starker Reibung mitgenommen, dann spannt sich der Faden b und lüftet vermittels des Hebels h die untere Bremsbacke. Die Berechnung der Leistung geschieht bei dieser Bremse genau so wie bei der vorigen, also nach den Gleichungen (51) und (52). Selbstverständlich ist für Q wegen der Dezimalwage der zehnfache Betrag der aufgesetzten Gewichte Q_1 einzusetzen.

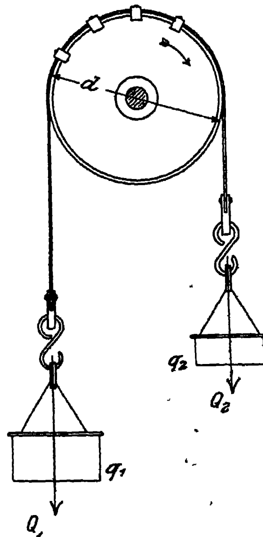


Fig. 189. Bremsband.

Für kleinere Motoren kann man zur Bremsung sehr gut **Bremsbänder** nach Fig. 189 benutzen. Ein Riemen oder Gurt wird mit U-förmigen Messingstücken versehen, welche das seitliche Herabrutschen des Bandes von der Scheibe verhindern. Die Schalen werden belastet mit Q_1 und Q_2 kg, dabei muß aber sein $Q_1 > Q_2$, wenn noch q_1 und q_2 die Gewichte der Schalen in Kilogramm bedeuten, dann ist das Drehmoment:

$$D = [(Q_1 + q_1) - (Q_2 + q_2)] \cdot \frac{d}{2} \text{ in mkg} \quad . \quad . \quad (53)$$

und die Leistung des Motors wird:

$$N = \frac{[(Q_1 + q_1) - (Q_2 + q_2)] \cdot d \cdot n \cdot \pi}{60 \cdot 75} \text{ in PS} \quad . \quad (54)$$

Hierbei ist der Scheibendurchmesser d in m einzusetzen.

Will man mit dem Bremsband die Maschine stärker belasten, dann muß der Druck des Bandes auf die Scheibe verstärkt werden und gleichzeitig die Differenz zwischen Q_1 und Q_2 vergrößert werden. Man muß deshalb gleichzeitig in beiden Schalen die Gewichte vermehren, in Q_1 aber stärker als in Q_2, so lange, bis das Band auf der sich drehenden Scheibe im Gleichgewicht bleibt. Das Gewicht Q_2 kann man auch durch eine am Boden befestigte Federwage ersetzen, dann läßt sich die Einstellung des Bandes leichter erreichen.

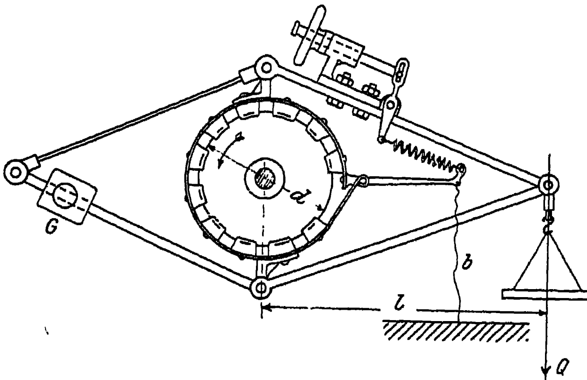


Fig. 190. Selbstregelnde Bandbremse.

Auch die **Bandbremsen** kann man **selbstregelnd** ausführen, wie hier ebenfalls zuerst von Brauer geschehen ist. In Fig. 190 ist eine solche Bremse gezeichnet, welche aber durch Anwendung der starren Stangen auf einen Pronyschen Zaum zurückgeführt ist. Die Wirkungsweise der Regelungsvorrichtung geht aus der Figur hervor, sie wird hier ebenfalls durch einen Faden b bewirkt. Das Band ist mit einer Anzahl Holzklötzen versehen, um eine größere Abkühlungsfläche zu erzielen. G ist ein Gegengewicht, um die Vorrichtung bei Stillstand auszugleichen. Auch hier ist das Drehmoment:

$$D = Q \cdot l \text{ in mkg}$$

und es gelten die beiden Formeln (51) und (52).

Die Nachteile der Reibungsbremsen bestehen vorwiegend in einer Ungenauigkeit, hervorgerufen durch die Veränderlichkeit der Reibung. Es treten deshalb besonders bei kleineren Motoren ziemliche Unsicherheiten bei Messungen mit diesen Apparaten auf. Weitere Unannehmlichkeiten verursacht die Wasserkühlung, wie schon erwähnt wurde.

Alle diese Nachteile sind bei den **elektromagnetischen Wirbelstrombremsen** vermieden. Diese Bremsen sind besonders für kleinere Motoren geeignet und arbeiten so vorzüglich, daß man sie als Präzisionsbremsen bezeichnen kann.

Die erste brauchbare Wirbelstrombremse, welche Fig. 191 zeigt, ist von Prof. Grau-Wien ausgeführt. Eine Kupferscheibe K

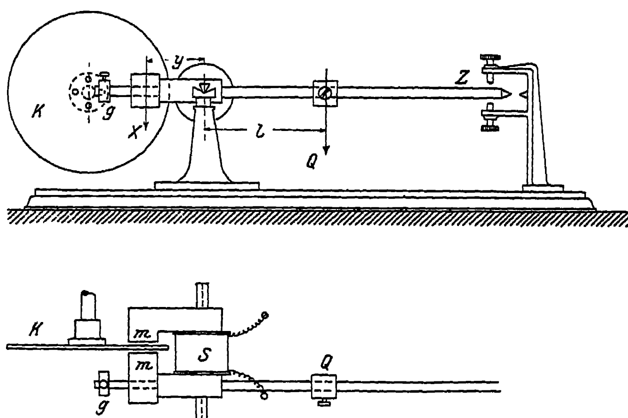


Fig. 191. Wirbelstrombremse nach Grau.

wird auf der Welle der zu untersuchenden Maschine befestigt. Diese Kupferscheibe dreht sich zwischen den Polen m eines Elektromagneten. g ist ein Gegengewicht, um den auf Schneiden gelagerten Magneten bei abgenommenem Laufgewicht Q auszugleichen. Wird durch die Spule S des Magneten ein Strom geleitet, dann dreht sich die Scheibe K durch das Kraftfeld des Magneten; es werden in der Scheibe K elektromotorische Kräfte induziert, die sich im Inneren der Scheibe in Form von Wirbelströmen ausgleichen. Die Wirbelströme sind die umgesetzte Arbeit des Motors und üben infolge ihrer Rückwirkung ein Drehmoment auf den Magneten aus von der Stärke $X \cdot y$, wobei X

die unbekannte Mittelkraft und y die ebenfalls unbekannte Entfernung ihres Angriffspunktes von dem Drehpunkt des Magneten, also der Schneide, bedeutet. Diesem unbekannten Drehmoment $X \cdot y$ muß das Gleichgewicht gehalten werden, indem man Q so lange verschiebt, bis der Zeiger Z vor der Spitze zwischen den Stellschrauben frei spielt. Dann ist das Drehmoment des Motors

$$D = X \cdot y = Q \cdot l$$

genau wie in Formel (51) und die Leistung ergibt sich nach Formel (52).

Durch Änderung des Stromes in der Spule S und durch gleichzeitiges Verschieben des Gewichtes Q läßt sich der Motor beliebig innerhalb der zulässigen Grenzen belasten. Wirbelstrombremsen dieser Art, welche nur mit Luftkühlung versehen sind, lassen sich bis zu 3 PS benutzen. Für größere Leistungen wird

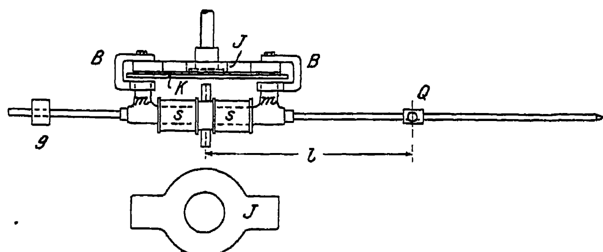


Fig. 192. Wirbelstrombremse von Siemens & Halske.

die Scheibe hohl ausgeführt und mit Wasserkühlung versehen. Solche Bremsen nach Feußner baut die physikalisch technische Reichsanstalt in Berlin bis 5 PS.

Siemens & Halske führen Wirbelstrombremsen für kleine Motoren nach Fig. 192 aus. K ist die auf die Welle des Motors gesetzte Kupferscheibe, m der Magnet, welcher zwischen den beiden Erregerspulen S mit Schneiden versehen ist. Der magnetische Rückschluß für den Kraftfluß, welcher bei m durch die Scheibe K geht, wird durch das eiserne Joch J erzielt, welches durch Messingbügel B an m befestigt ist. Die Wirkungsweise ist genau dieselbe wie vorhin schon beschrieben, auch hier ist

$$D = Q \cdot l \text{ in mkg}$$

und es gelten die Formeln (51) und (52).

Für größere Leistungen (bis zu 30 PS) ist die Bremse von Rieter-Winterthur geeignet, welche in den Figuren 193 und 194

gezeichnet ist. A ist ein gußeiserner Körper, welcher auf die Welle W aufgekeilt ist. In seinem Innern ist das klauenförmige

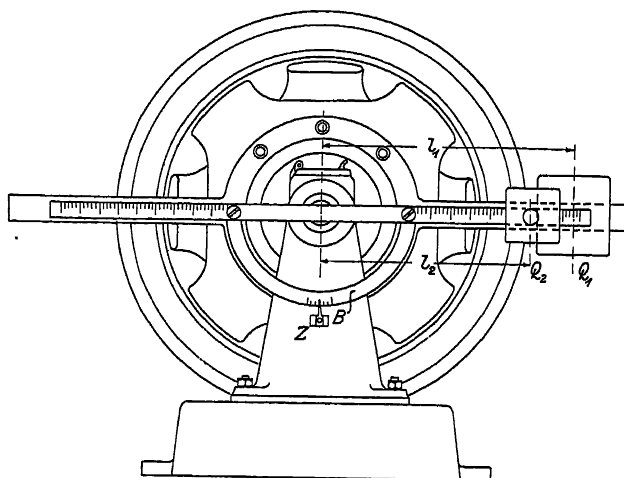


Fig. 193. Wirbelstrombremse von Rieter (Ansicht).

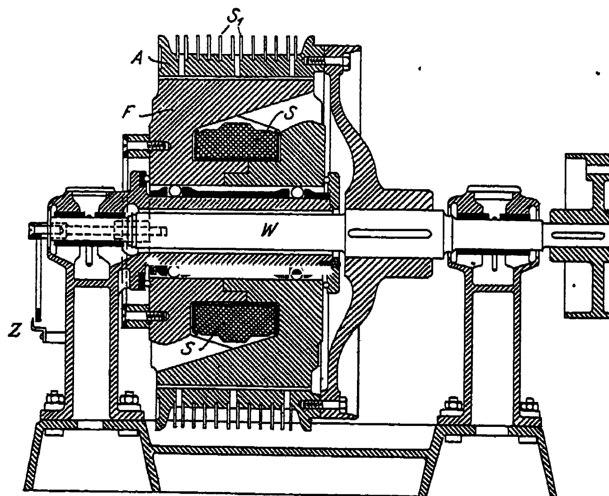


Fig. 194. Wirbelstrombremse von Rieter (Querschnitt).

Feld F auf Kugeln drehbar gelagert, welches eine Erregerspule S enthält. An dem Feldsystem F sind Arme befestigt, welche die

Laufgewichte Q_1 und Q_2 tragen. Wird der Körper A gedreht, dann wird infolge der durch das Feld in ihm entstehenden Wirbelströme das Magnetsystem F ein Drehmoment erfahren, welches wieder aufgehoben wird durch Verschieben der Gewichte Q_1 und Q_2. Die Wirkungsweise dieser Rieterschen Bremse ist also genau dieselbe wie die der vorher besprochenen Wirbelstrombremsen. Wenn Gleichgewicht vorhanden ist, wenn also der Nullpunkt auf der Teilung des Bügels B vor dem Zeiger Z spielt, ist das Drehmoment des Motors, welcher mit der Bremse zweckmäßig gekuppelt ist, um Verluste durch Riemenübertragung zu vermeiden:

$$D = Q_1 \cdot l_1 + Q_2 \cdot l_2 \text{ in mkg}$$

und die Leistung des Motors wird:

$$N = \frac{(Q_1 \cdot l_1 + Q_2 \cdot l_2) \cdot n \cdot 2\pi}{60 \cdot 75} \text{ in PS.}$$

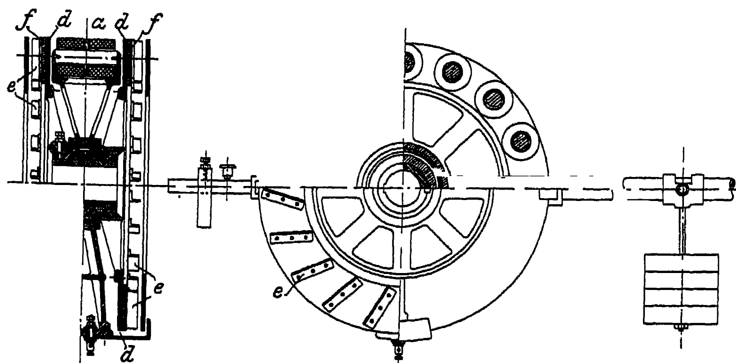


Fig. 195. Wirbelstrombremse von Morris & Lister.

Bei dieser Bremse treten aber Verluste durch Reibung auf, welche dadurch bestimmt werden müssen, daß man den Motor ohne Bremse leer laufen läßt und seine Leerlaufswatt W_0 bestimmt (vgl. Abschnitt VIII). Darauf kuppelt man ihn mit der Bremse, die aber unerregt sein muß, und bestimmt nochmals die Leerlaufsarbeit W'_0. Die Differenz beider Verluste gibt die Leerlaufsarbeit der Bremse, die für mehrere Umdrehungszahlen bestimmt werden muß und bei der Bestimmung der Leistung des Motors zu der aus D berechneten addiert werden muß, nachdem sie in PS umgerechnet ist. Es wird deshalb die Leistung in PS

$$N = \frac{(Q_1 \cdot l_1 + Q_2 \cdot l_2) \cdot n \cdot 2\pi}{60 \cdot 75} + (W_0' - W_0) \cdot 736 \quad . \quad (55)$$

In Fig. 195 ist ebenfalls eine für 30 PS Maschinen brauchbare Wirbelstrombremse dargestellt. *a* sind die Elektromagnete, mit denen der Gewichtshebel für das Laufgewicht verbunden ist, *d* sind die Kupferringe für die Wirbelströme. Die Magnete sind so bewickelt, daß bei Überlastung der Bremse eher ihre Bewickelung durchbrennt, als die Kupferringe. Die auf die mit den Kupferringen fest verbundenen Eisenringe *f* aufgeschraubten Winkeleisenstücke *e* wirken als Lüftungsflügel zum Kühlen. Da diese Bremse nur ein Laufgewicht hat, im Gegensatz zur vorigen nach Fig. 193 und 194, gilt hier die Gleichung 55 in der Form

$$N = \frac{Q \cdot l \cdot n \cdot 2\pi}{60 \cdot 75} + (W'_0 - W_0) \cdot 736.$$

Auch bei dieser Bremse, die ebenfalls zur Vermeidung von unkontrollierbaren Übertragungsverlusten mit dem Motor direkt gekuppelt werden muß, treten Reibungsverluste auf, deren Betrag $(W'_0 - W^0)$ ebenso bestimmt werden muß, wie bei der vorigen Bremse angegeben ist.

Achter Abschnitt.

Bestimmung und Trennung der Verluste in elektrischen Maschinen durch Leerlaufsversuche.

In jeder elektrischen Maschine treten folgende vier Arten von Verlusten auf: Ummagnetisierung, Wirbelströme, Stromwärme und Reibung. Hiervon lassen sich die Ummagnetisierung, Wirbelströme und Reibung durch Messungen an der leerlaufenden Maschine feststellen und einzeln trennen. Die Verluste durch Stromwärme lassen sich durch Rechnung bestimmen, denn sie sind einfach

$$J_a^2 \cdot r_a + i^2 \cdot r_s,$$

wobei J der Strom im Anker, r_a dessen Ohmscher Widerstand, i der Strom in der Wickelung der Magnete, r_s deren Widerstand ist.

Da die übrigen drei Verluste, wie schon erwähnt, nur an der leerlaufenden Maschine ermittelt werden können, so darf man nicht aus diesen Verlusten auf den Wirkungsgrad schließen wollen. Der Wirkungsgrad muß vielmehr durch die im siebenten Ab-

schnitt gegebenen Methoden direkt ermittelt werden. Die Feststellung und Trennung der Verluste bei Leerlauf, die übrigens nicht wesentlich von denen bei Vollast abweichen, hat einen ganz anderen Zweck; sie läßt erkennen, ob die einzelnen Teile der Maschine gut oder schlecht beansprucht sind, und ist deshalb für den Konstrukteur der Maschine von großer Wichtigkeit.

Die Verluste sind bei Leerlauf von denen bei Belastung aus folgenden Gründen verschieden: Bei Leerlauf ist die Feldverteilung der Maschine (vgl. Fig. 120) eine ganz andere als bei Be-

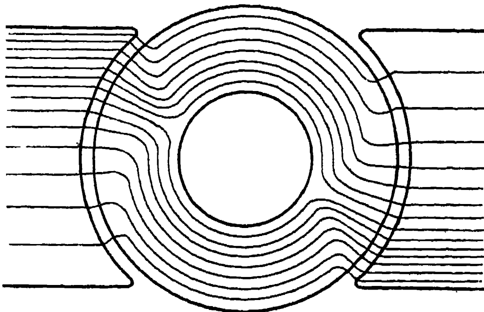


Fig. 196. Kraftfluß in einer belasteten Maschine.

lastung. In Fig. 196 ist das der Feldverteilung entsprechende Kraftflußbild einer belasteten Gleichstrommaschine gezeichnet. An zwei gegenüberliegenden Polkanten entsteht infolge der Rückwirkung des Ankerfeldes eine Verdichtung, an den beiden anderen Kanten eine Schwächung des Feldes. Es entstehen bekanntlich bei Gleichstrommaschinen mit Nutenankern durch die pendelnden Bewegungen des Kraftflusses in den Polrändern Wirbelströme, diese sind also bei Leerlauf andere als bei Belastung; außerdem sind die Ankerverluste geändert, weil auch hier Verschiebungen des Feldes auftreten.

Bei Wechselstrom kommen zwischen Leerlauf und Belastung in ähnlicher Weise Unterschiede zustande, ebenfalls durch die Wirkung des Ankerfeldes, welches hier außerdem noch von der Phasenverschiebung abhängt (vgl. S. 169).

Methode von Peuckert.

Eine vielfach verwendete Methode zur Trennung der Verluste ist die Auslaufsmethode von Peuckert. (ETZ 1901, S. 393.)

Ihre Anwendung ist in folgendem begründet: Bewegt sich ein Massenpunkt m mit einer Geschwindigkeit v in der Sekunde, dann besitzt er ein Arbeitsvermögen:

$$L = \frac{m v^2}{2}.$$

Ein Körper besteht aus vielen Massenpunkten, folglich besitzt ein in Bewegung befindlicher Körper das Arbeitsvermögen:

$$L = \Sigma \cdot \frac{m v^2}{2}.$$

Dreht sich ein Körper um eine Achse, z. B. der Anker einer Maschine, dann hat ein Massenpunkt m im Abstand ϱ vom Drehpunkt die Geschwindigkeit:

$$v = \varrho \cdot \omega,$$

wobei $\omega = \frac{2 \pi n}{2}$ ist, wenn n die Umdrehungszahl in der Minute bedeutet. Es ist also:

$$\Sigma \cdot \frac{m v^2}{2} = \Sigma \cdot \frac{m \varrho^2 \omega^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} \cdot \Sigma \, (m \varrho^2),$$

weil ω für alle Punkte desselben Körpers den gleichen Wert hat. Der Ausdruck

$$\Sigma (m \varrho^2) = J_m.$$

ist das Trägheitsmoment.

Es wird also das Arbeitsvermögen:

$$L = \frac{\omega^2}{2} \cdot J_m.$$

Schaltet man nun einem in Drehung befindlichen Anker plötzlich durch Ausschalten die Energiezufuhr ab, dann wird die in ihm aufgespeicherte Arbeit dazu verbraucht, die Verluste zu decken, er wird also mit immer mehr abnehmender Umlaufszahl schließlich zum Stillstand kommen. Läßt man ihm beim Ausschalten sein Feld, in dem man in der Schaltung (Fig. 197) nur den Anlasser A ausschaltet, i aber in der vollen Stärke läßt, dann wird die aufgespeicherte Arbeit zur Deckung der durch das Feld hervorgerufenen Verluste Ummagnetisierung und Wirbelströme, sowie der Reibung verbraucht. Die Stromverluste sind Null, weil kein Strom durch den Anker geht. Schaltet man aber gleichzeitig mit J auch die Erregung i aus, dann wird die aufgespeicherte Arbeit nur von der Reibung aufgezehrt. Im letzten Fall wird die Maschine erst nach längerer Zeit zum Stillstand kommen.

In der Schaltung in Fig. 197 ist noch folgendes zu bemerken: Die zu untersuchende Maschine läuft als Motor leer. Das Feld ist von einer fremden Stromquelle konstant erregt. Vor den

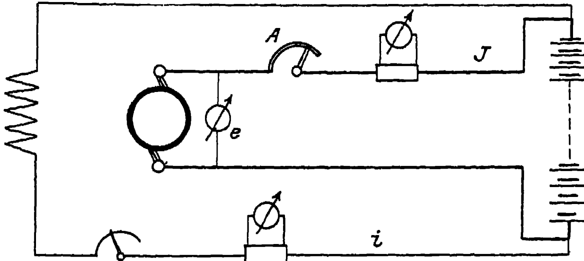


Fig. 197. Schaltung zur Bestimmung der Leerlaufsarbeit.

Anker wird ein Anlasser A geschaltet, der den Leerlaufstrom der Maschine dauernd ohne schädliche Erwärmung aushält, man schaltet deshalb bei großen Maschinen ihrer mehrere parallel. Die Magneterregung muß direkt von der Batterie abgenommen werden und nicht am Motor, weil durch den veränderlichen Strom J des Motors die diesem zugeführte Spannung infolge Spannungsverlustes in der Leitung schwanken kann und dann i nicht konstant bleibt.

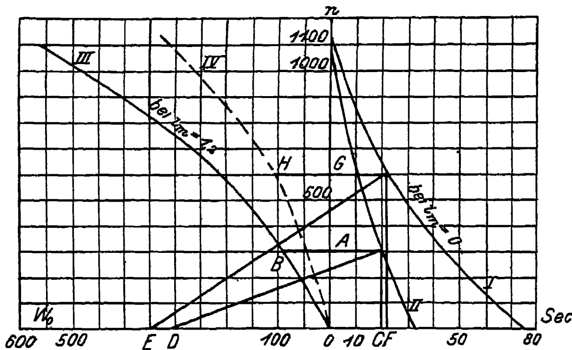


Fig. 198. Auslaufskurven und Leerlaufskurven.

In Fig. 198 sind die aufzunehmenden Kurven gezeichnet. Kurve I ist die Auslaufskurve einer Maschine für gleichzeitig mitausgeschaltete Erregung, also für $i_m = 0$. An dem so aus-

laufenden Anker wurde dann alle 5 Sekunden die Tourenzahl n bestimmt. Kurve *II* ist die Auslaufskurve für die stärkste Felderregung, bei der man die Verluste trennen will, im vorliegenden Fall für $i_m = 1{,}2$ Ampere. Da hier noch entsprechend der Feldstärke außer der auch bei Kurve *I* vorhandenen Reibung die Ummagnetisierung und die Wirbelströme im Anker gedeckt werden müssen, kommt der Anker schon nach 32 Sekunden zum Stillstand, während er bei Kurve *I* 75 Sekunden gebraucht.

Für irgend einen Augenblick t wird nun der Arbeitsverbrauch in der Sekunde, also der Effekt gegeben durch:

$$-\frac{dL}{dt} = \frac{d\left(\frac{\omega^2}{2} \cdot J_m\right)}{dt} = \frac{J_m}{2} \cdot \frac{d\omega^2}{dt} = J_m \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt};$$

weiter ist:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi \cdot n}{30},$$

also wird:

$$-\frac{dL}{dt} = J_m \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{dn}{dt} = J_m \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot n \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Der Ausdruck $n\frac{dn}{dt}$ ist die Subnormale der Auslaufskurve.

Der Wert $J_m\left(\frac{\pi}{30}\right)^2$ ist für ein und dieselbe Maschine eine Konstante.

Man kann also setzen:

$$-\frac{dL}{dt} = C \cdot n \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Der Ausdruck $-\frac{dL}{dt}$ ist der Arbeitsverbrauch in der Sekunde, also Effektverbrauch, der in Watt ausgedrückt wird. Es ist also der Wattverbrauch für die Verluste proportional der Subnormale $n \cdot \frac{dn}{dt}$ der betreffenden Auslaufskurve. Kennt man die Konstante C, dann läßt sich also aus der Auslaufskurve die Verlustkurve berechnen. C ist aber schwierig zu bestimmen. Man ermittelt deshalb C aus zwei Kurven. Es wird aufgenommen Kurve *III* in Fig. 198, wobei man in der Schaltung Fig. 197 die Erregung der Magnete auf denjenigen Wert einstellt, bei dem die Verluste bestimmt werden sollen (hier $i = 1{,}2$ Ampere), schaltet

dann den Anlasser A ganz auf Kurzschluß, so daß der Motor die volle Spannung e und den stärksten Leerlaufstrom J erhält und liest ab: J, e und die Tourenzahl n. Darauf verringert man e durch Zurückdrehen der Kurbel von A (nach rechts in Fig. 197) und erhält dann ein entsprechend geringeres J und n, so fährt man fort, immer in der gleichen Weise die Spannung e mit dem Anlasser zu verringern. Die Produkte $e \cdot J$ sind die Leerlaufswatt. Von diesen sind abzuziehen die Stromwärmeverluste $J^2 \cdot r_a$, wobei r_a der Ankerwiderstand ist und die Differenz

$$W_0 = e \cdot J - J^2 \cdot r_a$$

wird, abhängig von den zugehörigen Werten für n, aufgetragen und gibt Kurve *III* in Fig. 198. Weiter bestimmt man in der schon angegebenen Weise die Auslaufskurve *II* für dieselbe Erregung wie bei Kurve *III* und die Auslaufskurve *I* für $i_m = 0$, wobei also die Erregung ausgeschaltet ist. Zur Bestimmung von C wird benutzt Kurve *II* und *III*. Es sind die Watt der Kurve *III* für ein bestimmtes n gleich $C \times$ Subnormale für dieses n der Kurve *II*. Aus Fig. 198 ergibt sich ohne Rücksicht auf Maßstäbe:

$$\overline{BA} = C \cdot \overline{DC}$$

oder

$$C = \frac{\overline{BA}}{\overline{DC}}.$$

Man konstruiert demnach für mehrere Punkte der Kurve *II* die Subnormale (senkrecht auf der Kurve in dem betreffenden Punkt) und bestimmt daraus C; weil alle Konstruktionen dasselbe C ergeben müssen, ist das Mittel aus diesen Werten für C zu nehmen. Ist C bestimmt, dann läßt sich die Verlustkurve *IV* für die Reibung aus Kurve *I* ableiten. Es ist z. B. die Länge $\overline{HG}$, also die Watt für Reibung bei $n = 600$ Touren bestimmt durch

$$\overline{HG} = C \cdot \overline{EF}.$$

Führt man diese Konstruktion für eine Anzahl Punkte durch, dann läßt sich die Reibungskurve *IV* aufzeichnen.

Die weitere Trennung ist dann folgende: Man zieht von den gemessenen Werten W_0 der Kurve *III* die zugehörigen Watt für Reibung aus Kurve *IV* bei denselben Touren ab. Die Differenz ist dann der Verlust für Ummagnetisierung W_h und Wirbelströme W_w.

Darauf bildet man

$$\frac{W_h + W_w}{n}$$

und trägt dieses abhängig von n nach Fig. 199 auf. Diese Kurve ist eine schräg ansteigende Gerade aus folgendem Grunde: Die Ummagnetisierungsverluste sind proportional n, die Wirbelströme bei konstantem Feld proportional n^2. Sind W_ϱ die Reibungsverluste, dann gilt:

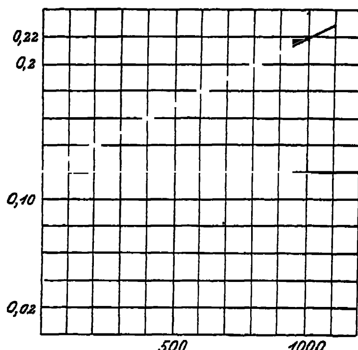


Fig. 199. Ermittelung der Hysteresis-Konstanten A.

$$e \cdot J - W_\varrho = W_h + W_w;$$
$$W_h = A \cdot n; \quad W_w = B \cdot n^2.$$

Dabei sind A und B Konstanten. Es ist also:

$$e \cdot J - W_\varrho = A \cdot n + B \cdot n^2$$

oder

$$\frac{e \cdot J - W_\varrho}{n} = A + B \cdot n$$

und dies ist die Gleichung einer Geraden. In Fig. 199 schneidet diese Gerade auf der Ordinate einen Wert ab von $\frac{e \cdot J - W_\varrho}{n} = A + B \cdot n = 0{,}11$ Watt. Da auf der Ordinate $n = 0$ ist, so ist $B \cdot n = 0$ und der Wert $0{,}12 = A$ oder $A = 0{,}12$ ist der Wattverbrauch für Ummagnetisierung bei $n = 1$, weil $A \cdot n = W_h$ ist.

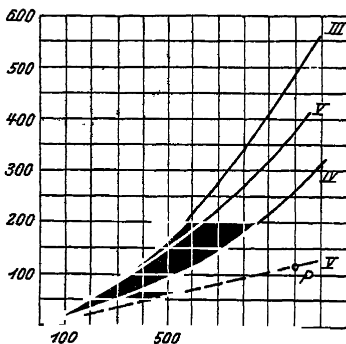


Fig. 200. Darstellung der Einzelverluste.

Für $n = 1000$ ergibt sich dann ein Ummagnetisierungsverlust $1000 \cdot 0{,}12 = 120$ Watt; diesen trägt man in Fig. 200 als Punkt P ein, die gestrichelte Gerade V ist dann der Verlust für Ummagnetisierung, abhängig von n bei der Erregung $i = 1{,}2$ Ampere. Kurve IV in Fig. 200 stellt nach Kurve IV in Fig. 198 die Reibungsverluste dar. Von Kurve IV aus trägt man die Ordinaten der gestrichelten Geraden V für die Ummagnetisierung nach

oben ab und erhält die ausgezogene Kurve *V*. Kurve *III* ist dieselbe wie Kurve *III* in Fig. 198, also die Summe der drei Verluste: Ummagnetisierung, Wirbelströme und Reibung ohne Stromwärme. Die untersuchte Maschine hat dann nach Fig. 200 bei der Erregung $i = 1{,}2$ Ampere bei $n = 1000$ Umdrehungen folgende Verluste:

für Reibung . . . . 260 Watt (aus Kurve *IV*),
„ Ummagnetisierung 120 „ (Punkt *P* auf gestrichelter Kurve *V*),
„ Wirbelströme . . 100 „ (Differenz der Ordinaten von der ausgezogenen Kurve *V* mit Kurve *III*).

Die Auslaufskurven werden so ermittelt, daß man etwa alle 5 Sekunden die Umdrehungszahl abliest, entweder mit einem Tachometer, noch besser aber am Voltmeter e Fig. 197, denn die Spannung des Ankers ist proportional der Umdrehungszahl des Ankers bei konstantem Feld. Es läßt sich deshalb auf die vorhandene Umdrehungszahl n schließen, wenn e_{max} die bei n_{max} auftretende Spannung ist aus der Gleichung:

$$n = \frac{n_{max}}{e_{max}} \cdot e.$$

Auch die Auslaufskurve der ohne Feld auslaufenden Maschine, also die Auslaufskurve der Reibung kann mit dem Voltmeter bestimmt werden, denn das Magnetsystem der Maschine besitzt nach dem Ausschalten des Erregerstromes ja noch das stets vorhandene ganz schwache Feld des remanenten Magnetismus, die Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste, die dieses schwache Feld hervorruft, sind aber verschwindend und können gegen die Reibung vernachlässigt werden. Das schwache remanente Feld induziert im Anker eine entsprechend schwache *EMK*, und wenn man ein genügend kleine Werte anzeigendes Voltmeter für die Auslaufskurve ohne Erregung verwendet, so lassen sich die Umdrehungen damit auch jetzt bestimmen.

Bei kleineren Maschinen mit wenig Schwungmassen kann man zuweilen die Auslaufskurve mit erregtem Feld nicht aufnehmen, weil die Maschine in zu kurzer Zeit zum Stillstand kommt. Die Auslaufskurve ohne Feld, also die Reibungskurve läßt sich wohl immer bestimmen. Wenn auch sie sich nicht mehr aufnehmen läßt, dann ist die Maschine so klein, daß derartige Versuche zur Ermittelung der Verluste bei ihr überhaupt unwichtig

sind und nicht ausgeführt werden, wie z. B. bei kleinen Ventilatormotoren, Nähmaschinenmotoren usw. Um nun solche Maschinen, deren Reibungskurve durch Auslaufen bestimmt werden kann, ebenfalls untersuchen zu können, bestimmt man deren Auslaufskurve für erregtes Feld nach Linke, ETZ 1905, S. 610. Das Verfahren ist folgendes: Man bestimmt genau, wie bei Kurve *III* Fig. 198 schon beschrieben, die Leerlaufswatt $e \cdot J - J^2 r_a = W_0$ für die höchste Erregung i und trägt sie nach Fig. 201 auf.

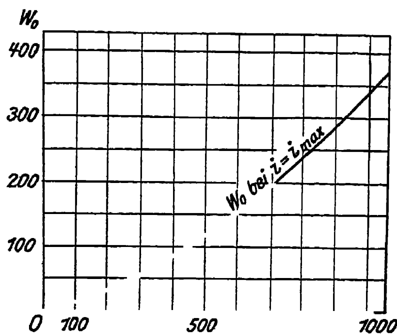


Fig. 201. Leerlaufswatt abzüglich Stromwärme bei stärkstem Erregerstrom.

Es ist:

$$\text{Effekt} = \text{Kraft} \times \text{Geschwindigkeit},$$

$$L = P \cdot v,$$

$$P = m \cdot p,$$

wobei m Masse, p Beschleunigung ist,

also
$$\frac{L}{v} = m \cdot p;$$

oder
$$\frac{L}{v} = m \cdot p;$$

da die Masse konstant ist und die Geschwindigkeit proportional der Tourenzahl n, so kann man setzen $v = C' n$, also:

$$\frac{L}{C' n} = mp$$

oder
$$\frac{L}{n} = C_1 \cdot p.$$

Man bildet nun für eine Reihe von Punkten aus der Kurve für W_0 in Fig. 201 die Werte $\frac{W_0}{n}$ und trägt diese Werte, abhängig von n in Fig. 202, auf (Kurve AB gestrichelt). Die Ordinaten dieser Kurve sind ein Maß für die Verzögerung bei der jeweiligen Tourenzahl während des Auslaufens. Es ist allgemein

$$p = \frac{dv}{dt};$$

$$dt = \frac{1}{p} \cdot dv;$$

$$t = \int dt = \int \frac{1}{p} \cdot dv = C_2 \int \frac{1}{p} \cdot dn.$$

Man bildet nun die $\frac{1}{p}$ Kurve, also die reziproken Werte der Kurve AB in Fig. 202, die Kurve $\frac{1}{\frac{W_0}{n}} = \frac{n}{W_0}$, die ebenfalls in Fig. 202 gezeichnet ist als Kurve CD Wenn T die gesamte Auslaufszeit für die Tourenänderung von n_{max} bis $n = 0$ ist, so gilt:

$$T = C_2 \int_0^{n_{max}} \frac{1}{p} \cdot dn,$$

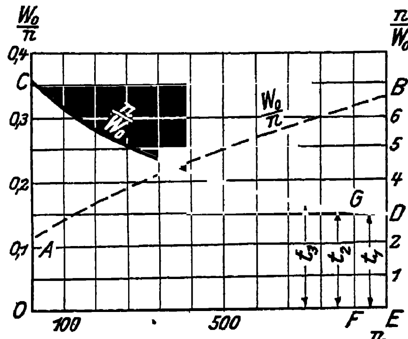


Fig. 202. Kurven zur Ermittelung der Auslaufskurven bei erregtem Felde.

das heißt die Fläche $OCDE$ ist ein Maß für die Auslaufszeit T, ebenso ist die Fläche $FEDG$ ein Maß für die Auslaufszeit t_1 von $n_{max} = 1000$ bis $n_1 = 900$ (vgl. Fig. 202). In ähnlicher Weise findet man die weiteren Auslaufszeiten t_2 von $n_1 = 900$ bis $n_2 = 800$, t_3 usw., und zwar teilt man zu diesem Zweck die ganze Fläche $CDEO$ in die einzelnen Teile $FEDG$ usw., deren Grundflächen aus derselben Tourendifferenz (in Fig. 202 jedesmal 100) bestehen. Die mittleren Ordinaten t_1, t_2, t_3 dieser rechteckähnlichen Flächen sind proportional den Auslaufszeiten von n_{max} bis n_1, von n_1 bis n_2 usf. Hierauf zeichnet man nach Fig. 203 einfach in irgend einem Maßstab die aus Fig. 202 ermittelten Zeiten t_1, $t_1 + t_2$, $t_1 + t_2 + t_3$ zu den zugehörigen Touren n auf, und um nun noch die Sekundenteilung der Ordinate zu bestimmen, zeichnet man die gesamte Auslaufszeit T für die erregte Maschine, die man durch einen Versuch beobachten muß (hier 9 Sekunden), auf einer schrägen Linie auf und teilt durch die gestrichelten Parallelen die Ordinate, deren Länge 0 9 durch den Schnitt der Auslaufskurve

bestimmt ist, in die entsprechende Anzahl Sekunden ein. Man hat dann in Fig. 203 die Auslaufskurve der erregten Maschine, entsprechend der Kurve *II* in Fig. 198. Die Kurve *I* bei unerregter Maschine, die immer eine längere Auslaufszeit besitzt,

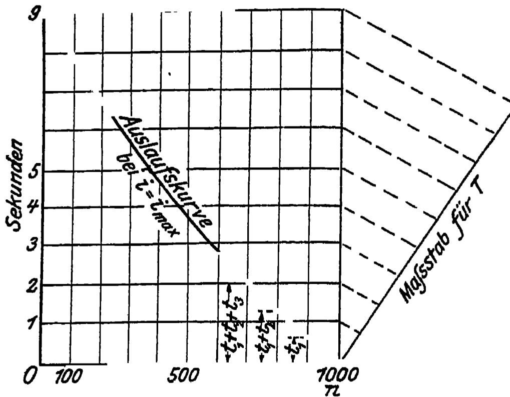


Fig. 203. Bestimmung der Auslaufskurve.

muß direkt beobachtet werden, wie schon bemerkt wurde. Im übrigen erfolgt dann die Trennung der Verluste genau nach der Methode von Peuckert.

Ermittelung der Leerverluste bei synchronen Wechsel- und Drehstrommaschinen.

Die von Peuckert angegebene Methode der Auslaufskurven läßt sich auch nach einigen Abänderungen bei synchronen Wechsel- und Drehstrommaschinen anwenden. Man treibt die zu untersuchende Maschine vermittels Riemen durch einen Motor an und bestimmt die Riemenspannung nach irgend einer der im Abschnitt VII gegebenen Methoden. Hat man die Erregung der untersuchten Maschine auf diejenige einreguliert, für welche man die Verluste ermitteln will, dann ändert man bei konstanter Erregung der Wechselstrommaschine die Tourenzahl des antreibenden Motors und bestimmt jedesmal die zugehörige Riemenspannung *P*. Aus den beobachteten Werten für *P* und der jedesmaligen Tourenzahl der Wechselstrommaschine läßt sich die Verlustkurve *III* in Fig. 198 bestimmen für Ummagnetisierung + Wirbelströme +

Reibung. (Da der Anker stromlos ist, braucht man die Stromwärme nicht abzuziehen.) Bezeichnet n die Tourenzahl der Wechselstrommaschine, P die Riemenspannung in kg, d ihren Riemenscheibendurchmesser in m, dann ist die zugeführte Leistung in PS nach S. 178:

$$N = \frac{d \cdot P \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 75},$$

und diese Leistung in Watt umgerechnet:

$$W_0 = \frac{d \cdot P \cdot \pi \cdot n \cdot 736}{60 \cdot 75} = d \cdot P \cdot n \cdot 0{,}514 \quad . \quad . \quad (56)$$

Die Bestimmung der beiden Auslaufskurven geschieht einfach dadurch, daß plötzlich der Riemen abgeworfen wird, einmal bei eingeschalteter, einmal bei ausgeschalteter Erregung. Es läßt sich dann die Trennung der Verluste, in Watt ausgedrückt, genau nach der Methode von Peuckert vornehmen.

Ermittelung der Leerverluste bei asynchronen Wechsel- und Drehstrommaschinen.

Bei den asynchronen Wechsel- und Drehstrommaschinen, welche meist als Motore Verwendung finden, ist die Trennung der Verluste durch Auslaufskurven unmöglich, weil die Wickelung des Läufers geschlossen sein muß, damit dieselben Sättigungsverhältnisse in der Maschine vorhanden sind, als wie beim normalen Betrieb. Das Feld ist aber ein Drehfeld, und bei erregtem Felde läßt sich deshalb hier keine Auslaufskurve aufnehmen, weil der Läufer durch das Drehfeld induziert und infolge seiner Ströme ein Drehmoment erfahren würde. Man muß daher die Verluste auf andere Weise trennen. Die Bestimmung der Reibungsverluste geschieht nach Dr. Benischke, ETZ 1901.

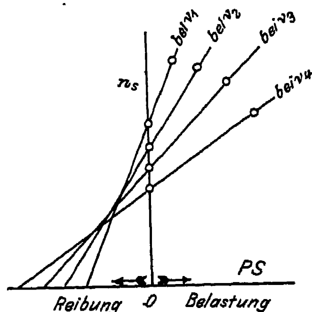


Fig. 204. Reibungsbestimmung nach Benischke.

Man bestimmt die äußere Leistung des Motors mit aufgelegtem Bremsband oder durch Wirbelstrombremse (S. 184) bei sehr schwachen Belastungen, abhängig von den Schlüpftouren n_s. Bei sehr

schwacher Belastung ist das Drehmoment proportional den Schlüpftouren, die Kurven müssen also bei konstanter Periodenzahl ν gerade Linien sein. Es wird zunächst bei einer Periodenzahl $\nu = \nu_1$ gemessen, und zwar ein Punkt bei Leerlauf (ohne Bremsband), also auf der Ordinate, wo die äußere Belastung Null ist, dann bei ganz schwacher Belastung. Beide Punkte sind in Fig. 204 durch kleine Kreise bezeichnet. Durch beide Punkte zieht man eine Gerade, welche bis zum Schnitt mit der nach rückwärts verlängerten Abszisse durchgezogen wird und auf dieser ein der Reibung in PS proportionales Stück, von Null aus gerechnet, abschneidet, weil dann, wenn die Schlüpftouren Null sind, was auf der Abszisse der Fall ist, im Läufer, der dann synchron läuft, nur Reibungsverluste auftreten können, wenn man von den Schwankungen des Feldes absieht, die sehr klein sind und außerdem durch die dämpfende Wirkung der kurzgeschlossenen Läuferwickelung zum größten Teil überhaupt vermieden werden. Die ganze Abszisse der einzelnen Kurven in Fig. 204, vom Schnittpunkt der Geraden aus gerechnet, stellt eigentlich die gesamte auf den Läufer übertragene Arbeit dar, also äußere Belastung + Reibung + Ummagnetisierung + Wirbelströme + Stromwärme. Die drei letzten Verluste sind aber bei den schwachen Belastungen, also kleinen Schlüpftouren des Läufers ohne weiteres zu vernachlässigen. Man bestimmt nun nach Fig. 204 noch mehrere Kurven bei verschiedener Periodenzahl ν und kann dann aus den zugehörigen Reibungsabschnitten die Reibungskurve aufzeichnen, nachdem man die Reibungswerte aus den PS umgerechnet hat in Watt nach der Beziehung:

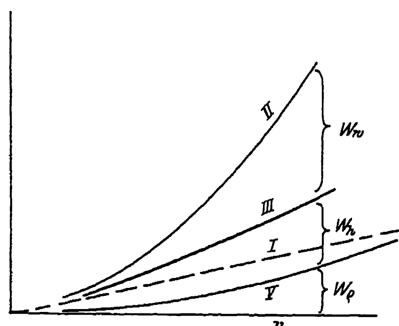


Fig. 205. Einzelverluste bei asynchronen Motoren.

$$1 \text{ PS} = 736 \text{ Watt}.$$

Die Reibungskurve wird nach Fig. 205 aufgezeichnet in Watt W_ϱ, abhängig von der Periodenzahl ν (Kurve V). Weiter sind die Kurvenscharen in Fig. 206, also die Leerverluste — Stromwärme $= W_\varrho + W_h + W_w = W_0$ für Reibung, Ummagnetisierung

und Wirbelströme, in Watt bei veränderlicher Spannung E zu bestimmen, welche dem Motor bei verschiedenen konstanten Perioden ν_1, ν_2, ν_3, ν_4 zugeführt werden müssen, indem man von der mit dem Wattmeter gemessenen elektrischen Leistung die jeweilige Stromwärme $3 J^2 w_p$ abzieht, wobei w_p der Widerstand der einzelnen Phase ist und J der Phasenstrom. Aus den Kurvenscharen in Fig. 206 kann jetzt die Kurve II in Fig. 205 abgeleitet werden, welche die Leerverluste — Stromwärme $= W_\varrho + W_h + W_w = W_0$ für eine bestimmte Feldstärke des Motors, abhängig von der Periodenzahl ν, ergibt. Es ist:

Fig. 206. Leerlaufs-Watt bei verschiedenen Perioden.

$$E = J \times \text{scheinbarer Widerstand} = J \cdot \sqrt{r_1^2 + L^2 \cdot \omega^2}.$$

Dabei sind E und J mit Volt- und Amperemeter gemessene Werte, $\omega = 2 \pi \nu$ und $r_1 = \sqrt{3} \,.\, r_p$. Es wird also:

$$\sqrt{r_1^2 + L^2 \cdot \omega^2} = \frac{E}{J},$$

woraus folgt:

$$L = \sqrt{\frac{\frac{E^2}{J^2} - r_1^2}{(2 \pi \nu)^2}}.$$

Soll der Motor untersucht werden bei einer Feldstärke, welche einem bestimmten Magnetisierungsstrom i_m entspricht, dann ist. zu bedenken, daß

$$i_m = \frac{E}{L \cdot 2 \pi \nu} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (57)$$

ist, vgl. hierzu Fig. 53 S. 56.

Will man die Trennung der Verluste für mehrere Feldstärken vornehmen, so darf stets derselbe Wert für L benutzt werden, denn innerhalb der bei Drehfeldmotoren üblichen Eisensättigungen bis höchstens $B = 8000$ ist L konstant, weil die Magnetisierungskurve einer jeden Maschine bis zu solchen Sättigungen noch eine Gerade ist.

Es ergibt sich aus Formel (57) für ν_1 der Wert E_1, für ν_2 der Wert E_2, für ν_3 der Wert E_3 usf.

Bei diesen Spannungen E_1, E_2, E_3, E_1 (Fig. 206) ist also das Feld oder der Magnetisierungsstrom i_m von derselben Stärke, so daß die zu den Punkten P_1, P_2, P_3, P_1 gehörigen Ordinaten die Kurve *II* in Fig. 205 bei konstantem Felde ergeben. Die weitere Trennung der Verluste läßt sich wie bei Gleichstrom ausführen. Man trägt die Differenz der Ordinaten der Kurven *II* und *V* aus Fig. 205, welche $W_h + W_w$ allein ohne Reibung darstellen, dividiert durch ν abhängig von ν auf, also $\frac{W_h + W_w}{\nu}$ abhängig von ν, und erhält die schräge Gerade in Fig. 207.

Die Ummagnetisierungsverluste W_h sind proportional der Periodenzahl, weil ja die Geschwindigkeit des Drehfeldes proportional ν ist und die Wirbelströme sind proportional ν^2, es muß also $\frac{W_h + W_w}{\nu}$, abhängig von ν, wieder eine Gerade ergeben, wie die Fig. 199 bei Gleichstrom. Der Abschnitt dieser Geraden in Fig. 207 auf der Ordinate gibt die Ummagnetisierungsverluste für $\nu = 1$, folglich kann man für ein bestimmtes ν die Hysteresis berechnen und Gerade *I* in Fig. 205 entsprechend den Ummagnetisierungsverlusten bei der betreffenden Feldstärke zeichnen. Trägt man dann die Ordinaten dieser Kurve *I* von *V* aus nach oben ab, so erhält man Kurve *III* und hat damit die Verluste für Wirbelströme, Ummagnetisierung und Reibung getrennt.

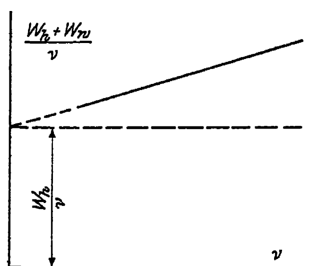


Fig. 207. Ermittelung des Hysteresisverlustes für $\nu = 1$.

Die Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste verteilen sich auf Ständer und Läufer. Sie lassen sich nicht mehr für beide Teile trennen, haben aber auch ihren Hauptursprung im Ständer, denn bei Leerlauf ist die Schlüpfung des Läufers klein und außerdem kommen für diese Verluste beim Läufer immer nur die Schlüpftouren in Frage, während beim Ständer die Geschwindigkeit des Drehfeldes maßgebend ist. Versucht man durch Antreiben des Läufers von außen Ständer- und Läuferverluste zu trennen, dann muß man den Läufer mit genau derselben Geschwindigkeit antreiben, wie sie das Drehfeld besitzt. Der Läufer hätte dann, wenn man von Feldschwankungen absieht, die, wie schon er-

wähnt, unbeträchtlich sind, gar keine Verluste außer der Reibung, aber die Feldverteilung wäre eine ganz andere wie im gewöhnlichen Zustand des Motors, wo der Läufer ebenfalls Strom führt, und wo das wirkliche Feld erzeugt wird durch Ständer- und Läuferamperewindungen gemeinsam.

Neunter Abschnitt.

Schlußbemerkungen über bei Messungen zu beobachtende Regeln und über Protokollführung.

Bei allen Messungen muß man stets darauf achten, daß diejenigen Größen, welche innerhalb gewisser Grenzen willkürlich angenommen werden und welche zur Berechnung notwendig sind, notiert werden. Hierzu gehört besonders bei Winkelbestimmungen mit Fernrohr und Spiegel die Entfernung von der Skala zum Spiegel, ferner bei Prüfspulen, welche zur Bestimmung von Streuungen u. dgl. dienen, die Windungszahl der Spulen, ihre Maße usw.

Bei Aufnahmen mit Meßwiderständen, welche nicht direkt anzeigen, sondern mit Vorschaltwiderständen (Voltmeter) oder Meßwiderständen (Amperemeter) verbunden sind, notiert man die Werte der Widerstände, die Konstanten der Instrumente und ihre Ausschläge und rechnet die Volt oder Ampere aus diesen Angaben nach dem Versuch aus.

Für Maschinenmessungen sind je nach dem Zweck der Untersuchung besondere Formulare zu benutzen, welche man sich vor der Messung selbst aufstellt. Einige Anhaltspunkte dafür sind folgende Beispiele:

Vor jedes Formular sind gewöhnlich nachstehende allgemeine Bemerkungen zu setzen:

Modell .... Nr. ... als $\frac{\text{Motor}}{\text{Generator}}$

für ... Volt .... Amp. bzw. .... PS ...... Touren.

Die Maschine ist vor Beginn des Versuches ..... Stunden mit .... Belastung bei .... Touren gelaufen.

Erregung .... Schaltung der Erregerspulen ......

Ankerwiderstand .... Ω bei .... ^{0} C.

$\frac{\text{Kupfer-}}{\text{Kohle}}$ Bürsten Nr. .... Stück pro Stift. Stiftzahl ....

Temperatur vor dem Versuch .... ⁰ C Luft,
.... ⁰ C Anker,
.... ⁰ C Magnete,
„ nach „ „ .... ⁰ C Luft,
.... ⁰ C Anker.

Widerstand der Erregerwickelung vor dem Versuch .... Ω,
„ „ „ nach „ „ .... Ω.

Verwendete Instrumente ....

Bemerkungen ....

....

Diese obigen Notizen sind fast immer für Maschinenmessungen notwendig. Für die besonderen Zwecke einer bestimmten Messung gelten dann besondere Formulare, z. B.:

Regulierungskurve.

Aufgenommen am .... durch ....

Volt	Amp.	*n*	Erregung	Bemerkungen	
					Maschine No. .... als Generator.

Belastungsprobe.

Volt	Amp.	Belastung an der Bremse kg	*n*	Watt	
					Maschine No. .... als Motor.

Unter Bemerkungen würde Bürstenverstellung, Grenze der Funkenbildung oder sonstiges Wichtige einzutragen sein.

Für jeden Zweck kann man in ähnlicher Weise sich ein Formular aufstellen, welches alle Werte enthalten muß, die not-

wendig sind, um die Meßergebnisse jederzeit kontrollieren zu können.

Bei schwankendem Betrieb und immer dann, wenn mehrere Instrumente eingeschaltet sind, muß man die Ablesungen zu gleicher Zeit vornehmen. Man stellt also an jedes Instrument einen Beobachter, und auf ein gegebenes Zeichen lesen sämtliche Beobachter ihr Instrument ab und notieren die Ablesung. Das Zeichen zum Ablesen wird durch denjenigen gegeben, welcher das am schwierigsten abzulesende Instrument beobachtet.

Bei Kurvenaufnahmen nehme man nicht zu viele Werte auf, sondern nur so viele, als unbedingt erforderlich sind, um die Kurve mit Sicherheit zeichnen zu können. Anfänger machen gerade hierbei den Fehler, durch möglichst genaues und vieles Beobachten gute Werte erhalten zu wollen, und entdecken dann beim Aufzeichnen der Kurven, daß diese sehr schlecht ausgefallen sind trotz der großen Mühe. Das hat gerade seinen Grund in der Langsamkeit bei der Messung. Jede Maschine ändert ihre Temperatur abhängig von der Belastung, und gebraucht man für eine Messung zu viel Zeit, dann treten Temperaturänderungen im Eisen und in den Lagern ein, es ändern sich die Widerstände und damit die Verluste usw. Es sind deshalb Maschinenmessungen nach der nötigen Überlegung auszuführen, kurz und bestimmt die Ablesungen vorzunehmen und dann sofort Änderungen in der Schaltung auszuführen, damit die Messung genau werden kann.

Bei Kurven mit Krümmungen, also bei Magnetisierungskurven im Knie, Feldverteilungskurven an den Polkanten oder bei Kurven, welche ein Maximum haben, sind besonders in der Nähe dieses oder der Krümmungen mehr Punkte zu bestimmen, als bei mehr geradlinig verlaufenden Teilen der Kurven. Man muß daher über den ungefähren Verlauf der Kurven unterrichtet sein, also entweder einen rohen Vorversuch gemacht haben, was überhaupt zwecks schneller und richtiger Bedienung der Schaltapparate sehr zweckmäßig ist, oder man zeichnet einfach ungefähr die Ausschlagswerte der Instrumente während der Messung auf; man merkt dann sofort, wann bei einer Kurve eine Krümmung eintritt, und erkennt auch, ob die Zahl der Beobachtungen für den beabsichtigten Zweck genügt.

Druck der Königl. Universitätsdruckerei H. Stürtz A. G., W.